

Rudolf A TOMANEC

Metode ispitivanja mineralnih sirovina

u pripremi mineralnih sirovina



Beograd, 2000.

Univerzitet u Beogradu
Rudarsko-geološki fakultet
Katedra za pripremu mineralnih sirovina

Rudolf A. TOMANEC

Metode ispitivanja mineralnih sirovina

u pripremi mineralnih sirovina
(sa rešenim zadacima)



Beograd, 2000.

Autor

Prof. dr Rudolf A. TOMANEC, dipl. ing. geologije
Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu

Udžbenik

Metode ispitivanja mineralnih sirovina
u pripremi mineralnih sirovina

Recenzenti

Prof. dr František ŠPALDON

Dopisni član Slovačke akademije nauka
Košice, Republika Slovačka

Prof. dr Dušan SALATIĆ

Dopisni član Kraljevske Belgijske akademije nauka i
redovni član Inženjerske akademije Jugoslavije

Izdaje: Rudarsko-geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu

Džušina 7, 11000 Beograd, Jugoslavija

Po odluci Uredjivačkog odbora za izdavačku delatnost Rešenjem broj 5/99
od 17.11. 1999. godine

Za izdavača: dekan RGF *prof. dr Zoran PETKOVIĆ*

Tehnička priprema / kompjuterski slog

Aleksandra TOMAŠEVIĆ, dipl. inž. rudarstva

Naslovna strana

Arh. Jožef ČIPA, dipl. inž.

Menadžment i marketing: Zagorka KOMAD, dipl. inž. geol., OMNIPROJEKT – Zemun.

Tiraž: 300 primeraka

Štampa: Elvod, Lazarevac.

CIP – Katalogizacija u publikaciji

Narodna biblioteka Srbije, Beograd

622.7.09 (075.8)

TOMANEC, Rudolf A.

Metode ispitivanja mineralnih sirovina: u pripremi mineralnih sirovina: (sa rešenim zadacima) / Rudolf A. Tomanec. – Beograd: Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta. 2000 (Lazarevac: Elvod). – 315 str. : ilustr. : 24 cm

Tiraž 300. Bibliografija uz svako poglavlje. – Registar.

ISBN 86-7352-013-4

A) Rude – priprema – uzorkovanje

ID=85230604

©Sva prava zadržava autor

Naslovna strana

1. Ilustracija korica prvog broja časopisa "European Microscopy and Analysis" od 1983. godine. Polarizacioni mikroskop iz 1877. godine (Carl Zeiss, 1816-1888.), optički sistem je bio od Schottovog stakla, a proračun izvršen prema matematičkim obrascima Ernst Abbe-a iz 1875.
2. Laboratorijsko sito firme Endecotts Ltd.
3. Džonsov mikrorazdeljivač.
4. Pribor za frakcionisanje u teškim tečnostima.
5. Laserski submikronski granulometar MasterSizer - Malvern Instruments.
6. Analizator slike

Autor se zahvaljuje organizacijama koje su svojim donatorstvom pomogle u
pripremi za štampu i štampanje ove knjige.

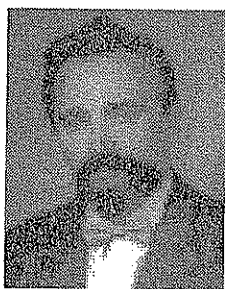
- “Omniprojekt”, Zemun;
- “Kosovoprojekt” DP Geotehnika, Beograd;
- Ministarstvo rudarstva i energetike, Reopublički društveni fond za geološka istraživanja;
- “Gemaks” – Inženjering, Beograd;
- Rudnik “Rudnik”, Rudnik;

SADRŽAJ KNJIGE

Predgovor	1
Glava 1. Uzorak i uzorkovanje	3
Glava 2. Vlaga u mineralnoj sirovini	47
Glava 3. Hemijski sastav sirovine	55
Glava 4. Mineralni sastav sirovine	69
Glava 5. Granulometrijski sastav mineralne sirovine	139
Glava 5 a. Subsitovna analiza	163
Glava 6. Oslobađanje minerala	203
Glava 7. Selektivno izdvajanje minerala na osnovu gustina	251
Glava 8. Selektivno izdvajanje minerala na osnovu magnetskih osobina	289
Glava 8 a. Selektivno izdvajanje minerala na osnovu električnih osobina	303
Indeks pojmova	309
Sadržaj	315
O autoru	



ISBN 86-7352-013-4



BIOGRAFIJA AUTORA

Dr mr Rudolf A. Tomanec, profesor Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, rođen je 13. maja 1949. godine u Senti. Gimnaziju je završio u Senti školske 1968. godine. Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu upisao je 1968. godine. Po diplomiranju (tema: Opšte karakteristike izotopnog sastava olova na području Kopaonika), na Smeru za istraživanje ležišta mineralnih sirovina, Geološkog odseka, upisao se 1975. godine na posleddiplomske studije usmerenja Prospekcija i istraživanje ležišta mineralnih sirovina. Godine 1978. odbranio je magistarski rad "Metodologija interpretacije rezultata regionalne geohemijske prospekcije SR Makedonije". Doktorsku disertaciju "Stepen oslobađanja minerala u zavisnosti od sadržaja korisne komponente u sirovini i finoće otvaranja" odbranio je 1989. godine, na RGF u Beogradu.

Magistarski rad je 1979. godine nagrađen iz Fonda "*Milan Milićević, inženjer geologije*", kao izuzetan doprinos oblasti istraživanja ležišta mineralnih sirovina. Veće Smera za ILMS 1979. godine nagrađuje tezu kao "...izvanredan i jedinstven naučni, magistarski rad". 1980. godine Savez inženjera i tehničara Jugoslavije, Komitet za ILMS, dodelio je mr Rudolfu Tomanecu *Diplomu "Tehnike"* za najbolji rad objavljen te godine iz oblasti geologije.

Godine 1975. se zapošljava kao stručni saradnik na *Katedri ekonomske geologije* RGF u Beogradu, gde sa prekidima radi godinu dana. Na *Katedru za pripremu mineralnih sirovina*, RGF u Beogradu, dolazi kao asistent pripravnika 1978. godine na predmet *Metode ispitivanja mineralnih sirovina u PMS*. U zvanje asistenta izabran je 1981. godine, u zvanje docenta 1989. godine, a u zvanje vanrednog profesora izabran je 1995. godine.

Godine 1983. i 1984., u trajanju od osam meseci, dr Rudolf Tomanec je boravio i radio u Iranu, gde je preko tehničke pomoći naše zemlje bio angažovan, kao ekspert savetnik za aplikativnu rudnu mikroskopiju i oslobađanje minerala. Radio je na obučavanju inženjerskog kadra na porfirskom ležištu bakra Sarcheshmeh, zatim Meiduk i Chalmes, provincija Kerman.

Tokom izrade doktorske disertacije 1985. godine boravio je na Kraljevskoj rudarskoj školi u Londonu, a 1987. godine bio je na specijalizaciji na istom koledžu, gde je dovršio eksperimentalni deo svoje disertacije.

Kao autor i koautor objavio je, do 2003. godine, 170 naučnih i stručnih radova, od kojih su 47 saopštena i štampana u zbornicima radova sa naučnih skupova u zemlji, a 88 radova je objavio i štampao u zbornicima radova sa međunarodnih skupova u inostranstvu. Autor je publikovao 14 naučnih radova u domaćim naučnim časopisima, a 14 u stranim, odnosno međunarodnim renomiranim publikacijama. U monografijama je štampao 3 poglavlja i 4 rada. Sarađivao je na izradi 45 studija i 15 naučno-istraživačkih projekata. Trenutno vodi projekat strategijskog značaja pri Ministarstvu za zaštitu životne sredine. Koautor je monografije "*Kinetika mlevenja*" (1994.). Autor je knjige, prvog udžbenika kod nas "*Metode ispitivanja mineralnih sirovina u PMS*" (2000.), a prvopotpisani koautor skripti "*Rudne parageneze*" (2000.); prvopotpisani koautor udžbenika-atlasa "*Rudne parageneze*", pripremljenog za štampu. 2002. godine, kao koautor, izdaje "*Engleslo-srbski i srbsko-engleski Mali terminološki rečnik iz pripreme mineralnih sirovina*".

U pripremi ove knjige, od njene prve verzije do konačnog izgleda, pomogli su mi, na različite načine, moji prijatelji i kolege, na čemu im se najiskrenije na ovom mestu zahvaljujem.

Za grafičku i tehničku pripremu materijala Jeleni Kablar, dr Katarini Romić, Jovanu Dvorskom i Aleksandri Tomašević. Posebno izražavam svoju zahvalnost gospodinu Čipa Jožefu, inženjeru arhitekture za dizajn i opremu korica knjige, kao i pripremu materijala za kompakt disk. Kolegi i prijatelju dr Peteru Fečku za poseban trud da ova knjiga bude štampana.

Poštovanim recenzentima prof. dr Františku Špaldodu i prof. dr Dušanu Salatiću na trudu koji su uložili pri čitanju kao i za sugestije i savete oko konačnog uobličavanja i uređenja ove knjige.

PREDGOVOR

Na osnovu dvadesetogodišnjeg rada, sa studentima (treće godine studija) usmerenja na Pripremu mineralnih sirovina, kroz predavanja i vežbe, iz predmeta *Metode ispitivanja mineralnih sirovina u pripremi mineralnih sirovina*, napisana je ova knjiga. Pisana je stilom i na način kako to, onima kojima je namenjena i koji je budu koristili, najviše odgovara.

Knjigu mogu koristiti, osim studenata na osnovnim studijama, i posle diplomci kao i doktoranti, te su na pregledan način istaknuti različiti nivoi saznanja i upoznavanja sa materijom, za različite korisnike, upotrebom različitih fontova.

Kako će knjigu koristiti studenti rudarstva i geologije, želja autora je bila da se u načinu saopštavanja verbalni sadržaji što više potkrepe grafičkim sadržajem, a narativni numeričkim, koji su ljudima od tehnike uvek bliži, a sve sa ciljem misaone usmerenosti na materiju o kojoj se čita i koja se uči.

U materiju su ugrađeni svi didaktički elementi i odgovarajući dizajn, a sve sa jednim ciljem – lakšeg savladavanja odredjenih zadataka.

Knjiga je podeljena na poglavlja koja odgovaraju metodskim jedinicama predvidjenih planom i programom nastave na ovom predmetu odnosno imaju prirodni sled operacija pri ispitivanju mineralnih sirovina. Prvo poglavlje se odnosi na *uzorak* i obradjuje pitanja kako pravilno prikupljati uzorke, gde, čime, koliko, kako ih obraditi i druga pitanja. Drugo, treće i četvrto poglavlje obuhvataju odredjena kvantitativno-kvalitativna ispitivanja na prikupljenim i obradjenim uzorcima, koja se odnose na *odredjivanje vlage, hemijskog sastava* i deo koji šire obradjuje *mikroskopska ispitivanja* odnosno identifikaciju minerala u sirovini i daje njihovu karakterizaciju. Ovo poglavlje završava sa racionalnom analizom i bilansom minerala. Peto poglavlje obradjuje *odredjivanje granulometrijskog sastava* sirovina, kako sitovnom analizom tako i nizom metoda subsitovnih analiza disperznih sistema. Šesto poglavlje je šire posvećeno, po prvi put kod nas, materiji koja razmatra *oslobađanje minerala* usitnjene, klasirane i kompletno determinisane mineralne sirovine. Sedmo poglavlje se odnosi na mogućnosti izdvajanja monomineralnih frakcija minerala iz kompleksnih paragenetskih asocijacija predhodno oslobodjenih minerala i precizno odredjenih karakteristika uz pomoć *pliva-tone analize*. P-T analiza se izvodi u teškim tečnostima na rudama metala, nemetala i tehnogenim mineralnim sirovinama. U osmom poglavlju se ispituje sirovina u pogledu mogućnosti *izdvajanja monomineralnih frakcija* magnetičnih minerala kao i ispitivanja koja se odnose na elektroprovodnost odredjenih minerala i njihovo razdvajanje. Na kraju su dati realni zadaci i uputstva za sastavljanje šema izdvajanja odredjenih minerala iz različitih asocijacija.

Svako poglavlje se završava spiskom najznačajnije u svetu literature koja tretira odredjenu oblast i namenjen je zainteresovanim, usko specijalizovanim, korisnicima gde mogu pronaći šire o materiji koju izučavaju.

Autor

SADRŽAJ GLAVE 1

1.1 UZORAK	5
1.1.1 Uzorak i uzorkovanje - osnovni pojmovi	5
1.2 METODE PRIKUPLJANJA UZORAKA IZ LEŽIŠTA MINERALNIH SIROVINA	6
1.2.1 Klasifikacija uzoraka	7
1.2.2 Izbor metode uzorkovanja	12
1.3 METODE IZDVAJANJA PARCIJALNIH UZORAKA U INDUSTRIJSKIM PROCESIMA	13
1.3.1 Klasifikacija materijala koji se uzorkuju	13
1.3.2 Metode izdvajanja uzoraka u industrijskim procesima	14
1.3.3 Pribor za izdvajanje uzoraka	18
1.3.4 Zakonitosti i parametri uzorkovanja	18
1.4 FAKTORI ODREĐIVANJA MINIMALNE KOLIČINE UZORKA	20
1.4.1 Primarni uzorak	20
1.4.2 Sekundarni uzorak	21
1.4.3 Principi određivanja minimalne mase uzorka	22
1.4.4 Principi određivanja minimalne mase tehnoloških uzoraka	23
1.4.5 Princip (jednačina) Ričard-Čečota	23
1.4.6 Princip (jednačina) Demond-Halferdala	27
1.4.7 Princip (jednačina) Vezina	31
1.4.8 Princip (jednačina) Bruntona	31
1.4.9 Princip (jednačina) Čermenka	31
1.4.10 Princip (jednačina) Žia	32
1.5 POSTUPAK OBRADE UZORKA	33
1.5.1 Uvod u obradu uzorka	33
1.5.2 Metode obrade uzoraka i izbor šema skraćivanja	33
1.5.3 Kvantiranje (četvrtanje)	36
1.5.4 Metod "devet tačaka"	36
1.5.5 Metod "šahovskih polja"	37
1.5.6 Frakciono (parcijalno) izdvajanje uzoraka	37

1.5.7 Metod prosecanja kanala.....	37
1.5.8 Žljebasti razdeljivači	37
1.5.9 Džonsov razdeljivač	37
1.5.10 Razdeljivačke kutije	38
1.5.11 Mehanički razdeljivači	38
1.5.12 Obrada uzorka pulpe	38
1.5.13 Opšte napomene kod sastavljanja šema obrade uzoraka.....	39

1.6 GREŠKE UZORKOVANJA I GREŠKE SKRACIVANJA 42

1.6.1 Greške skraćivanja	43
1.6.2 Statističke greške.....	43
1.6.3 Tehničke greške	43
1.6.4 Kontrola hemijskih analiza.....	43
1.6.5 Greške obrade uzoraka	44

1.7 LITERATURA 44

GLAVA 1

1.1 UZORAK

1.1.1 UZORAK I UZORKOVANJE - OSNOVNI POJMOVI

Uzorak je jedan manji deo rudnog tela ili ispitivanog materijala, izdvojen (uzet) po određenim pravilima, tako da što tačnije odražava kvalitet one mase sa koje je uzet. Uzorkovanje predstavlja proces uzimanja i obrade, a ponekad podrazumeva i ispitivanja uzoraka. Uzorkovanje mineralnih sirovina i proizvoda pripreme mineralnih sirovina je neophodan proces kontrole tehnoloških (laboratorijskih i industrijskih) procesa kod dobijanja i prerade rude sa ciljem iskorišćenja korisnih komponenta. Prema tome, *operacije uzimanja uzoraka i obrade sa skraćivanjem i ispitivanjem su deo procesa utvrđivanja kvaliteta mineralne sirovine u ležištu ili pogonu za pripremu mineralnih sirovina*. Uzimanje uzoraka iz ležišta se izvodi uz prisustvo rudničkih geologa i rudara eksploatatora i rudara pripremaša a na pogonu za pripremu mineralnih sirovina to izvodi inženjer pripreme. Inženjer pripreme je obavezan da se neposredno upozna sa osnovnim karakteristikama zaleganja ležišta i metodama eksploatacije rude, razblaženjima i uticajem ovih faktora na uslove procesa pripreme mineralnih sirovina, te da na osnovu ovih saznanja odredi kategoriju sirovine u tehnološkom pogledu i da utvrdi neophodnu količinu određenih tipova uzoraka.

U procesu uzimanja uzoraka, zavisno od postavljeneog cilja (zadatka) uzorkovanja, razlikuju se:

- generalni uzorak, koji se uzima iz veće mase polaznog materijala;
- parcijalni uzorci, uzeti tokom skraćivanja generalnog uzorka;
- konačni uzorak, dopremljen u laboratoriju na analizu.

Osnovne radnje procesa uzorkovanja su:

- prikupljanje ili uzimanje uzoraka;
- obrada uzorka sa skraćivanjem;
- ispitivanje uzoraka i analiza prikupljenih podataka.

Srednjim uzorkom se naziva materijal sastavljen iz niza porcija pojedinačnih uzoraka, uzetih sa različitih mesta uzorkovane mase, očeđnom i istovremeno.

Da bi se dobio reprezentativni srednji uzorak, materijal treba podvrgnuti postepenom smanjenju krupnoće (drobljenje, mlevenje), homogenizaciji i skraćivanju. *Stepen reprezentativnosti* prikupljenih uzoraka nije u svim slučajevima isti: veličina te promenljivosti zavisi od niza faktora, među kojima posebno mesto zauzima ravnomernost orudnjenja i veličina uzoraka.

Prema mestu i metodama prikupljanja svi uzorci se mogu podeliti u dve grupe:

- uzorci koji se uzimaju iz samog ležišta mineralne sirovine;
- uzorci prikupljeni na oborenoj, natovarenoj ili skladišnoj mineralnoj sirovini;
- uzorci koji se izdvajaju u industrijskim procesima (transportne trake, vagoni, barže, pulpovodi).

Treba napomenuti da je često u upotrebi, među stručnjacima za pripremu mineralnih sirovina, i jedna *opšta podela uzoraka po sukcesivnosti njihovog formiranja i njihove veličine*, naročito je to karakteristično kod uzorkovanja uglja, ali i drugih mineralnih sirovina, na primarne uzorke, laboratorijske, odnosno analitičke kao "sekundarne" uzorke, i tehnološke.

□ **Primarni (tovarni) uzorak**, koji je sastavljen od pojedinačnih uzoraka, uzetih iz pojedinih partija ove sirovine (odlikuju se relativno velikom količinom);

□ **Laboratorijski uzorak**, koji se dobija u postupku obrade primarnog uzorka, namenjenog laboratorijskim ispitivanjima i pripremi analitičkog uzorka;

□ **Analitički uzorak** služi za određivanje hemijskog sastava mineralne sirovine; (ovi kao i laboratorijski uzorci često se nazivaju i "sekundarni uzorci");

□ **Tehnološki uzorak**, uzet iz polazne sirovine (primarnog uzorka), namenjen je da se na osnovu njega ustanovi optimalna tehnološka šema pripreme i prerade kao i mogućnost kompleksnog iskorišćenja.

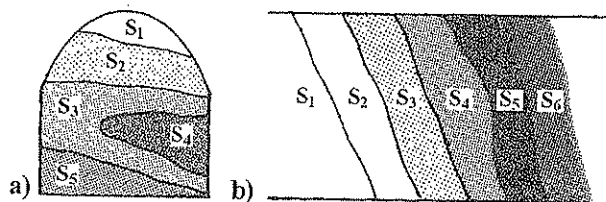
1.2 METODE PRIKUPLJANJA UZORAKA IZ LEŽIŠTA MINERALNIH SIROVINA

Različite vrste mineralnih sirovina, kao i razlike u promenljivosti orudnjenja, uslovljavaju mnoštvo načina uzimanja uzoraka iz samog ležišta. Svi oni mogu se svrstati u tri osnovne grupe uzorkovanja, razvrstane u zavisnosti od vrste istražnih radova, sastava materijala koji se podvrgava uzorkovanju ili stepenu tehnološke osvojenosti sirovine.

□ U prvu grupu spadaju metode uzimanja uzoraka iz rudarskih radova (istažnih ili eksploatacionih) ili izdanaka. Ovim postupcima se uzorkuju - rovovi, istražni jarkovi, istražni kopovi, poprečni hodnici, useci, stari i napušteni rudarski radovi. Postupci uzimanja uzoraka su ovde najmnogobrojniji, a kao najčešće korišćeni javljaju se krupnokomadasto, tačkasto, postupkom grube brazde, brazde, iz bušotina, slojno i masovno uzorkovanje.

□ U drugoj grupi su postupci uzimanja uzoraka iz bušotina. Razlike u načinima prikupljanja ove grupe uzoraka uslovljeni su vrstama bušenja, koje pak zavise od vrste sirovine i dubine njenog zaleganja. Najčešće se uzorkuju bušotine kolonskog bušenja, gde je materijal koji se prikuplja - jezgro ili se hvata materijal iz isplake. Određeni tipovi bušenja imaju i specifične postupke uzorkovanja (jalovišta, halde, ležišta rasipa).

□ Treću grupu čine postupci uzimanja uzoraka iz oborene, otpucale rudne mase na rudarskim radilištima, iz skladištane rude, iz vagoneta, sa transportnih traka, pri čemu ova grupa metoda uzimanja uzoraka podrazumeva ne samo mineralnu sirovinu već i proizvode pripreme mineralnih sirovina - koncentrate, međuproizvode i jalovinu.



Sl.1.1 Metode prikupljanja uzoraka skidanjem sloja na a-čelu radilišta, i b-sa površine bočnog zida hodnika rudarske prostorije.

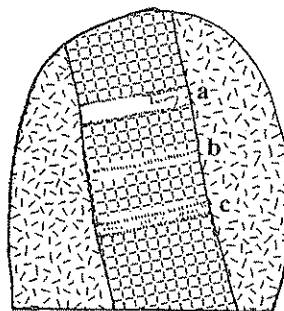
Uzorci koji odražavaju kvalitet mineralnih sirovina mogu biti sastavljeni od materijala uzetog sa više mesta ili samo sa jednog mesta. U prvom slučaju to su *kolektivni* uzorci a u drugom *individualni, pojedinačni*.

Kolektivni uzorci nastaju spajanjem više pojedinačnih uzoraka. Pri tome se može spajati više pojedinačnih uzoraka uzetih u neposrednoj blizini, kada ih nazivamo *zbiirnim uzorcima*, ili uzorci iz različitih, međusobno odvojenih (prostorno i vremenski) delova rudne mase koja se uzorkuje, kada ih nazivamo *grupni uzorci*.

Individualni ili pojedinačni uzorci mogu se, prema veličini i vidu uzoraka, grupisati u površinske, linijske i tačkaste uzorke.

① **Površinski uzorci** obuhvataju one uzorke koji se sastoje iz materijala uzetog sa određene površine rudnog tela ili uzorkovane materije (Sl.1.1 a, b). Ovoj grupi pripadaju:

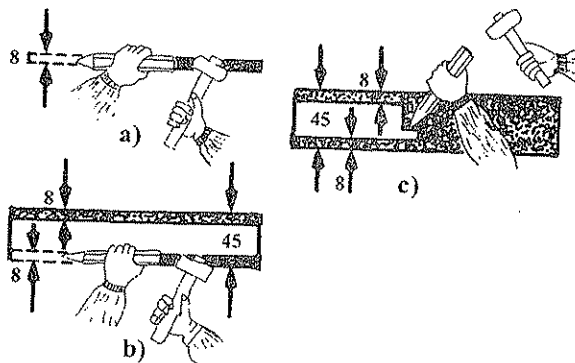
- **masovni uzorak** koji obuhvata sav ili deo materijala otkopanog pri prolazu rudarskog rada (hodnik, uskop, jarak i dr.) kroz rudno telo ili je izdvojen sa površine skladištane sirovine;
- **slojni uzorak** se sastoji od materijala koji se dobija skidanjem sloja, različite moćnosti, sa jednog dela ili celokupne površine uzorkovanog rudnog tela ili uzorkovane materije. U mnogim slučajevima slojni uzorak podseća na uzorkovanje širokom brazdom.



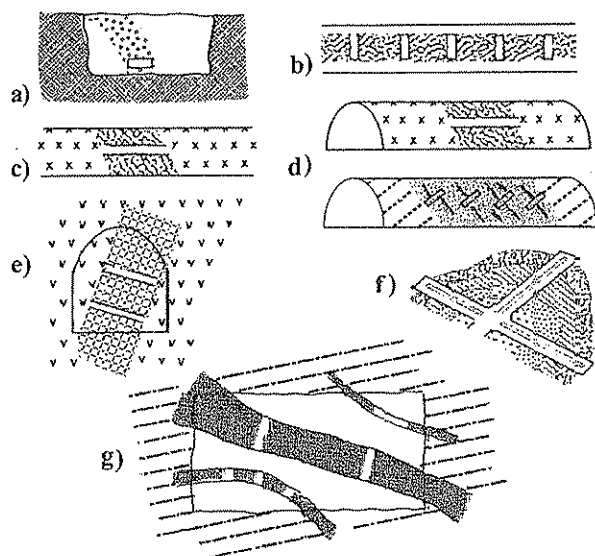
Sl.1.2 Prikupljanje uzoraka na čelu podzemnog hodnika metodom brazde; a-široka brazda; b-uska brazda, i c-gruba brazda.

② **Linijski uzorak** sastavljen je od materijala koji je iz rudnog tela uzet sa jednog pravca (Sl.1.2). U ovu grupu se mogu uvrstiti:

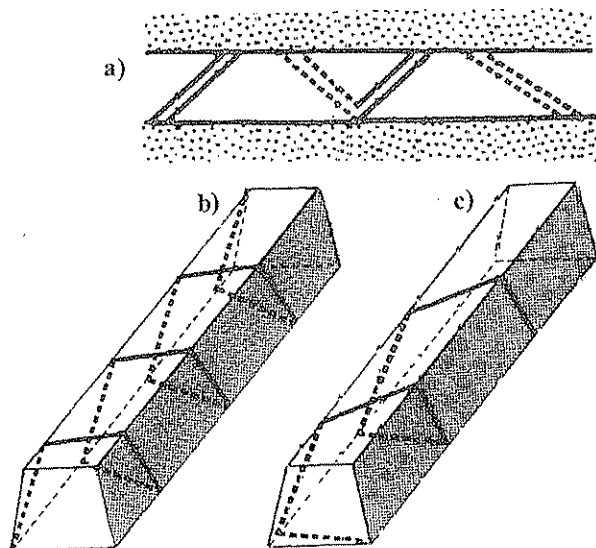
- **uzorak uzet brazdom** sastoji se od materijala koji se dobija pri izbijanju kanala - brazde preko uzorkovanog materijala (Sl.1.3). Položaj i profil brazde zavise od prilika od ležišta i stepena ravnomernosti raspodela pojedinih mineralnih komponenta u sirovini (Sl.1.4) i (Sl.1.5);
- **uzorci iz minskih rupa** obrazuju se od materijala koji se dobija prilikom bušenja minskih rupa;
- **uzorci iz bušotina** obrazuju se iz materijala koji se kao jezgro ili zajedno sa isplakom dobija pri bušenju istražnih ili ispitnih bušotina;
- **uzorci uzeti grubom brazdom** sastoje se od komada sirovine izbijenih neposredno jedan kraj drugog u jednom pravcu (po liniji) (Sl.1.2c).



Sl.1.3 Prikaz postupka izbijanja brazde pomoću dleta i čekića.



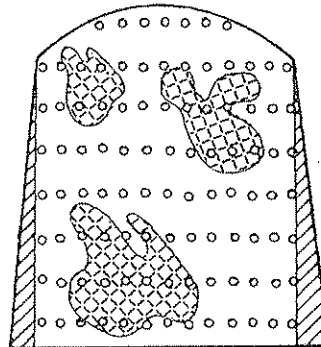
Sl.1.4 Prikaz mesta na kojima mogu da se izdvoje uzorci – metodama zasecanja brazde; a–poprečno na orudnjenu zonu na vertikalnom zidu površinskog kopa, kanala; b–upravno na orudnjenu zonu na dnu otvorenog rova; c–horizontalna brazda iz orudnjenog dela na širokom čelu radilišta; d–horizontalna brazda na boku horizontalnog rudarskog rada ili kaskadno poredane kose brazde zonarnog rudnog tela; e–brazde upravne na rudnu žicu na čelu radilišta; f–brazde po podnom ili krovnom delu duž pružanja istražnih i eksploatacionih hodnika zonarnog rudnog tela; g–brazde upravne ili duž vertikalnih rudnih žica istražnih raskopa ili površinskog kopa.



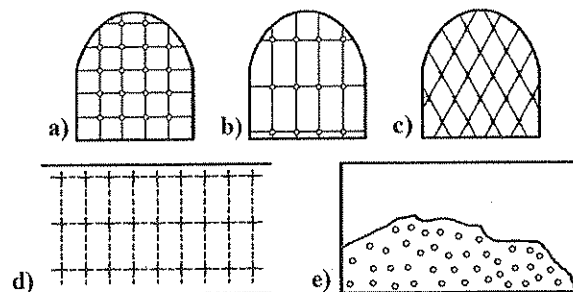
Sl.1.5 Metode zasecanja brazde u rudarskim radovima kod masivnih i impregnacionih tipova orudnjenja: a–kose brazde naizmenično postavljene sa obe strane hodnika; b–brazde postavljene u obliku neprekidne spirale, sa malim hodom; c–brazda u obliku neprekidne spirale sa dužim hodom.

③ Tačkasti uzorci čije se uzorkovanje sastoji u uzimanju – izbijanju pojedinih komada materijala sa rudnog tela (Sl.1.6). Komadi, koji moraju biti približno jednakih dimenzija, izbijaju se po određenoj mreži ili po određenim pravcima. Jedan uzorak sastoji se od više

pojedinačnih komada uzetih sa jedne površine ili strane – pravca (Sl.1.7).



Sl.1.6 Grubo odbijanje komada materijala na čelu hodnika – radilišta.



Sl.1.7 Ilustracija prikupljanja uzoraka tačkastom metodom: a–pravilna kvadratna mreža uzorkovanja na čelu hodnika; b–pravilna pravougaona mreža uzorkovanja; c–izdvajanje uzoraka sa uglova deltoida; d–uzorkovanje po mreži na bočnim zidovima duž hodnika; e–uzorkovanje oborene, otpucane rudne mase.

U tablici 1.1. prikazana je klasifikacija uzoraka koji se najčešće uzimaju na radilištu ili po istim postupcima sa skladištene, odložene, utovarene rudne supstance a na slici 1.8 prikazane su metode uzorkovanja sirovine ležišta kao i postupak formiranja kompozitnog uzorka, odnosno njegovu obradu.

U jednom rudnom ležištu, u zavisnosti od njegovih geoloških osobnosti, mogu se uzorci prikupljati ne samo jednom, već i pomoću nekoliko metoda (brazda, masovna, slojna i dr.).

Kod uzimanja uzoraka u ležištima građevinskog materijala primenjuje se metoda blokova. Uzeti blokovi monolita imaju najčešće oblik kocke ili paralelopipeda i podvrgavaju se fizičko-mehaničkim ispitivanjima.

1.2.1 KLASIFIKACIJA UZORAKA

Klasifikacija uzoraka može da se vrši i prema karakteru postavljenih zadataka uzorkovanja, tako se razlikuju: hemijski uzorci, mineraloški, granulometrijski, tehnički i tehnološki uzorci.

① **Hemijsko uzorkovanje** se vrši radi određivanja hemijskog sastava ispitivanog materijala i sadržaja korisnih i štetnih komponenata u istom. Ovaj vid uzorkovanja ima vrlo veliku primenu. Hemijsko uzorkovanje vrši se kako u fazi istraživanja i eksploatacije ležišta mineralnih sirovina, tako i kod kontrole sadržaja komponenata u proizvodima pripreme mineralnih sirovina

Tablica 1.1 Klasifikacija uzoraka prema metodama njihovog izdvajanja

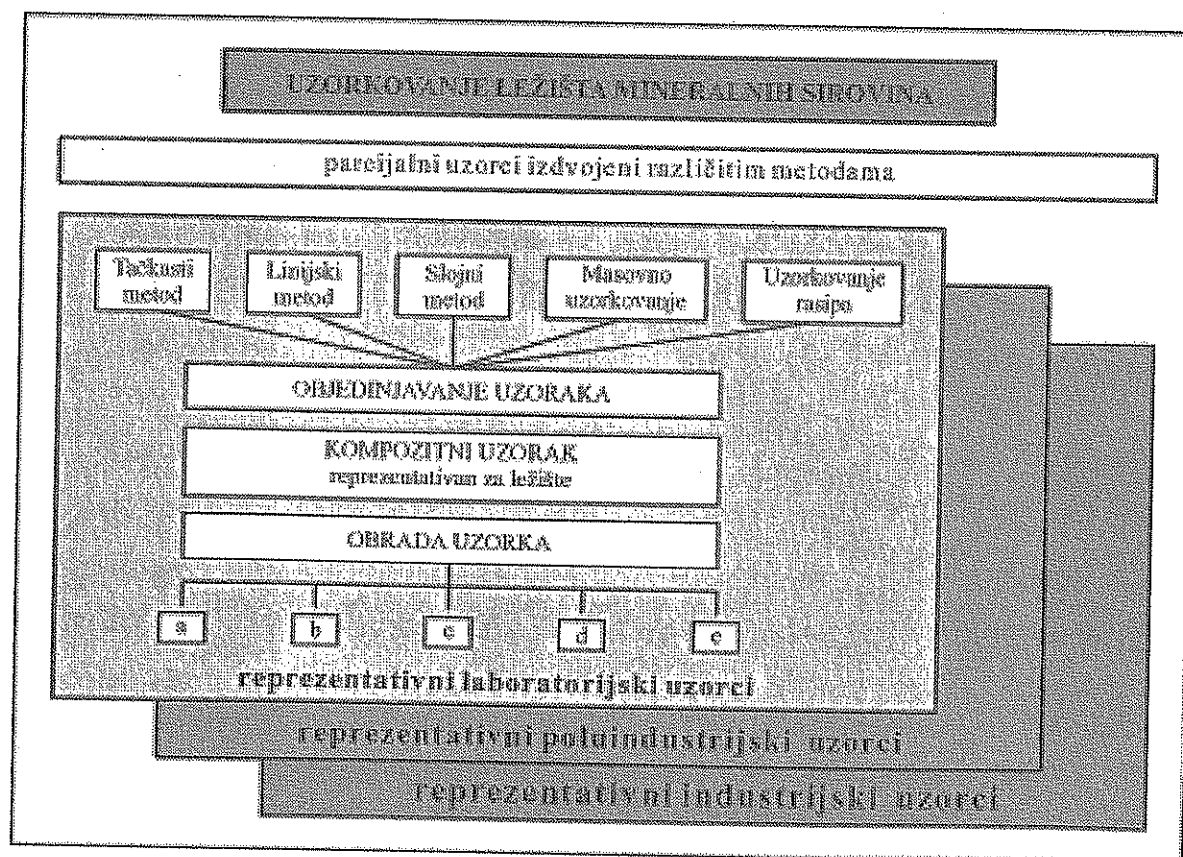
Pojedinačni uzorci	Površinski uzorci	Slojni uzorci	Potpuni
		Masovni uzorci	Nepotpuni
	Linijski uzorci	Uzorci brazdom	Uska brazda
			Široka brazda
		Uzorci iz minskih rupa	
		Uzorci iz bušotina	
	Tačkasti uzorci	Grubom brazdom	
		Uzorci po mreži	
Kolektivni uzorci	Zbirni uzorci	Uzorci po liniji	Prava
			Spirala, krug
	Grupni uzorci	Više pojedinačnih uzoraka uzetih u neposrednoj blizini	
		Uzorci prikupljeni iz različitih, međusobno odvojenih (prostorno i vremenski) delova rudne mase	

(rudi, koncentratu i jalovini). Klasifikacija uzorkovanja pri različitim fazama tehnološke osvojenosti ležišta, odnosno sirovine prikazana je u tablici 1.2. U fazi istraživanja hemijsko uzorkovanje služi za određivanje srednjeg sadržaja korisnih i štetnih komponenata u pojedinim delovima ležišta mineralnih sirovina; na osnovu rezultata hemijskog uzorkovanja vrši se okonturavanje rudnih tela i izdvajanje pojedinih blokova ili rudnih tela koja su izgrađena od različitih vrsta i tipova rude čiji tehnološki tretman zahteva posebne pristupe. Ciljevi i zadaci hemijskog uzorkovanja u fazi eksploatacije rudišta prilagođeni su uglavnom zahtevima racionalnog otkopavanja ležišta, a u fazi podmakle tehnološke osvo-

jenosti sirovine - kontroli kvaliteta i procesa. Svi vidovi hemijskog uzorkovanja u fazi eksploatacije mogu se, prema karakteru zadataka, svrstati u nekoliko grupa:

- operativno uzorkovanje
- kontrolno uzorkovanje
- eksperimentalno uzorkovanje

Metode prikupljanja uzoraka u fazi eksploatacije skoro se ne razlikuju mnogo od onih koje se koriste pri detaljnom istraživanju ležišta; razlika se očituje najviše u zadacima i putevima njihovog ostvarivanja.



Sl.1.8 Pregled metoda uzorkovanja ležišta mineralnih sirovina

Tablica 1.2 Klasifikacija uzorkovanja pri različitim fazama tehnološke osvojenosti ležišta, odnosno sirovine

Hemijsko uzorkovanje i mineralni sastav	Uzorkovanje Ležišta	Operativno uzorkovanje	Uzorkovanje pripremnih radova
			Uzorkovanje otkopa
		Kontrolno uzorkovanje	Kontrola proizvodnje
			Kontrola uzorkovanja
	Uzorkovanje rudne Supstance	Eksperimentalno uzorkovanje	Izbor tipa uzorka
			Izbor razmera uzoraka
			Gustina mreže uzorkovanja
		Naučno-istraživačko uzorkovanje	
		Operativno-kontrolno uzorkovanje	Uzorkovanje sirovine pre procesa koncentracije
			Uzorkovanje jalovišta
			Uzorkovanje proizvoda koncentracije
		Eksperimentalno uzorkovanje	

Hemijsko uzorkovanje (i mineralni sastav)	Uzorkovanje industrijskog Procesu	Operativno-kontrolno uzorkovanje	Kontrola rada pogona
		Eksperimentalno uzorkovanje	Ispitivanje rada pojedinih faza industrijskog procesa
		Naučno-istraživačko uzorkovanje	Snimanje rada industrijskog procesa

• **Mineraloško uzorkovanje** se vrši radi proučavanja mineralnog sastava i sklopa mineralnih sirovina. Cilj mineraloških uzorkovanja je uglavnom da se razjasne:

- **količinski odnosi** između pojedinih minerala i odredi sadržaj pojedinih mineralnih komponenata, da se definišu strukturne osobenosti rude, teksture, karakteristike asocijacije minerala, njihovo uzajamno prorastanje, krupnoća kristala, raspodela korisnih minerala i drugo;

- **zakonomernost i promenljivost** mineralnog sastava sirovine u ležištu, rasprostranjenost pojedinih minerala u određenim tipovima - vrstama mineralne sirovine;

- **fizičke osobenosti pojedinih mineralnih komponenata** - cepljivost, oblik i veličina zrna, krtost, magnetičnost, elektroprovodnost i dr. Mineraloške probe treba da odražavaju što tačnije srednji kvalitet mineralne sirovine. Naročito veliki značaj imaju ove osobine uzoraka u procesu pripreme mineralnih sirovina. Na osnovu mineraloških osobina uzoraka tehnolozi-inženjeri PMS određuju metode i verovatne šeme pripreme mineralnih sirovina kao i potrebnu finoću mlevenja radi optimalnog oslobađanja korisnih minerala. Zahvaljujući svojoj očiglednosti i brzini, mineraloške analize se široko koriste i kod operativnih kontrola tehnološkog procesa. Podaci dobijeni mineraloškim ispitivanjima omogućuju da se stvori približna slika o kvalitetu mineralne sirovine, kao i da se olakša sam proces pripreme. Ovom vidu uzorkovanja pripada i mineraloško ispitivanje šlihovala, dobijeni ispiranjem uzoraka prikupljenih iz rasipnih ležišta.

Na osnovu hemijskih i mineraloških analiza određuje se neophodnost izdvajanja, na samom ležištu, posebnih tehnoloških uzoraka ili se prave smeše (srednjih reprezentativnih) tehnoloških uzoraka od niza pojedinačnih uzoraka. Srednji uzorak sastavljen je proporcionalno udelu istovremene eksploatacije različitih vrsta rude i odgovarajuće promenljive jalovine. Mineraloški uzorci se mogu podeliti na dve podgrupe: kvalitativne i kvantitativne.

- **Kvalitativni mineraloški uzorci**, međutim, nisu uzorci koji reprezentuju srednji (maseni) sastav uzorkova-

nog materijala. Pre svega njih možemo nazvati mineraloškim specimenima, koji treba da odražavaju kvalitativni sastav, teksturne (prostorni razmeštaj mineralnih komponenata) i strukturne (veličinu i forme mineralnih zrna) osobenosti mineralne sirovine.

- **Kvantitativni mineraloški uzorci** koriste se kod mineraloških ispitivanja i kontroli (kvaliteta) sirovine i proizvoda koncentracije (Koncentrata, Međuproizvoda i Jalovine).

Posmatranjem, pod binokularnim mikroskopom, samlevene sirovine, može se pratiti stepen oslobođenosti mineralnih komponenata. Mikroskopska izučavanja rudnih i petrogenih preparata (šlifova), načinjenih od proizvoda pripreme mineralnih sirovina moguće je utvrditi stepen njihove kontaminiranosti štetnim primesama kao i otkriti uzroke gubitaka korisnih komponenata u jalovini tokom procesa pripreme mineralnih sirovina. Takve kvantitativne mineraloške analize omogućuju približno određivanje sadržaja korisnih minerala, a prema tome i njihovo iskorišćenje u koncentratima ukoliko je poznat njihov kvalitet.

- **Granulometrijsko uzorkovanje** sprovodi se zbog sitovnih i sedimentacijskih analiza, neophodnih za određivanje granulometrijskog sastava rastresitog (sipućeg) materijala i pulpi (suspenzija). Rad drobilinih postrojenja, rad mlinova i klasifikatora kontroliše se upravo podacima sitovne analize. Najbolji efekti koncentracije u pripremi mineralnih sirovina upravo se postižu pri optimalno kontrolisanoj finoći mlevenja sirovine.

- **Uzorci za određivanje vlage.** Određivanje sadržaja vlage u sirovini i proizvodima pripreme mineralnih sirovina ima dvojako značenje. Prvo, obično se određuje kvantitet i kvalitet suvih proizvoda i sirovine; prema tome za konačni obračun između potrošača i dobavljača kao i za sastavljanje materijalnog bilansa, neophodno je da bude utvrđen stepen vlažnosti proizvoda, ukoliko se njegova masa određuje na licu mesta zajedno sa vlagom. Drugo, sadržaj vlage u nekim proizvodima utiče na tehnološki

proces pripreme mineralnih sirovina, na primer na drobljenje, mlevenje, ili klasiranje. Uzimajući ovo u obzir, takve operacije kao što su filtracija, sušenje i druge sprovode se prema zadatoj vlažnosti proizvoda.

⑤ **Tehničko uzorkovanje** vrši se u onim slučajevima kad se o kvalitetu mineralne sirovine ne može dobiti potrebna slika na osnovu hemijskih uzorkovanja. To se prvenstveno odnosi na sirovine koje se upotrebljavaju kao građevinski, ukrasni i tehnički materijali. Tako pri procenjivanju azbestne sirovine, kao pokazatelj kvaliteta služe fizičke osobine sirovine (dužina vlakna, čvrstina, tekstilne osobine i dr.) u flogopitskim i muskovitskim ležištima, na primer, sem sadržaja ovih minerala, treba, između ostalog, odrediti, kao obeležje kvaliteta sirovine, i veličinu ploča liskuna, asortiman i njihovu strukturu. Za drago kamenje (dijamanti, rubini, topazi i dr.) značajna je veličina kristala, a zatim tehničke i juvelirske odlike sirovine. U mnogim slučajevima tehničko ispitivanje sirovina propraćeno je i hemijskim odnosno mineraloškim analiziranjem (ispitivanje vatrostačnih i keramičkih glina, talka i dr.). Kvalitet peska za livarstvo, na primer zahteva pored mineraloške analize i granulometrijske pokazatelje.

⑥ **Tehnološko uzorkovanje** se sprovodi da bi se odredile tehnološke osobine mineralne sirovine u pogledu pogodnosti koncentracije određenim metodama. Šta sve čini tehnološki uzorak i koja se sve laboratorijska ispitivanja izvode na njemu, prikazano je na slici 1.9. Sem toga, potrebno je da se prouči i mogućnost potpune, kompleksne valorizacije sirovine. Tehnološka svojstva mineralne sirovine određuju mogućnost i ekonomsku opravdanost njene prerade u cilju iskorišćenja svih

korisnih komponenata (kompleksne valorizacije) koje sirovina sadrži. Tehnološka svojstva mineralne sirovine zavise od ukupnih kvantitativnih pokazatelja od kojih pored sadržaja korisnih komponenata i štetnih primesa, primarni značaj imaju:

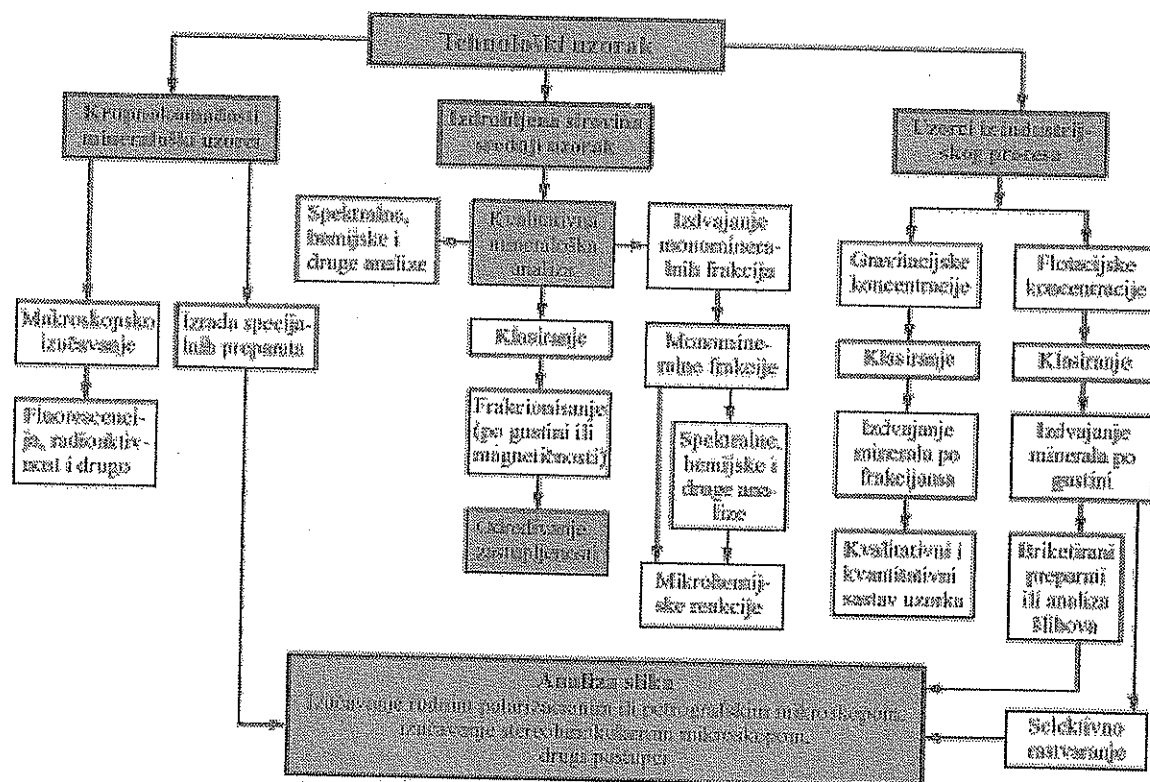
- mineralni sastav sirovine, distribucija korisnih komponenata i štetnih primesa po pojedinim mineralima, forme i dimenzije korisnih minerala, karakteristike međusobnih srastanja sa petrogenim, odnosno mineralima jalovine, teksture i strukture agregata minerala;

- fizička svojstva mineralne sirovine kao i svojstva minerala koji je čine, njihova tvrdina, krtoš, gustina;

- hemijski i mineralni sastav okolorudnih, pratećih stenskih masa - jalovine.

Na osnovu tehnoloških ispitivanja sirovine određuju se najracionalnije šeme i tehnološki režimi prerade, kao i tehničko-ekonomski pokazatelji prerade. To omogućava da se dobije slika o rentabilnosti budućeg otkopavanja i daljeg istraživanja ležišta.

Pored prikazanih tipova uzoraka, u fazi eksploatacije i prerade sirovine u postrojenjima za pripremu mineralnih sirovina uzima se čitav niz uzoraka, različitim postupcima, a koji imaju za cilj – *praćenje kvaliteta sirovine ili proizvoda koncentracije*, prikupljaju se i uzorci tehničke vode, otpadne vode, različitih rastvora, reagensa kao i uzorci vazduha radi zaštite životne sredine (atmosfera). Na slici 1.10 prikazana je klasifikacija i ciljevi uzorkovanja industrijskog procesa, sa osnovnim zadacima.



Sl.1.9 Formiranje tehnološkog uzorka i vrste ispitivanja.

UZORKOVANJE INDUSTRIJSKOG PROCESA

Kontrola rada pogona	Ispitivanje rada pojedinih faza industrijskog procesa	Snimanje rada industrijskog procesa
Kontrolno-operativno uzorkovanje	Eksperimentalno uzorkovanje	Naučno-istraživačko uzorkovanje usavršavanje procesa
1. izdvajanje parcijalnih uzoraka po smenama Reprezentativni smenski uzorak (U, K, M, J). 2. spajanje smenskih uzoraka Dnevni uzorak 3. Desetodnevni uzorak 4. Mesečni uzorak 5. Lotovi kontrola kvaliteta trž. proizvoda <u>Cilj:</u> izrada tehnološkog i tovarnog bilansa	1. Drobljenje i prosejavanje 2. Mlevenje i klasiranje 3. Koncentracija 4. Odvodnjavanje 5. Otpadne vode Parcijalni uzorci se spajaju u Reprezentativni uzorak za ispitivanu fazu procesa <u>Cilj:</u> poboljšanje rada uređaja po fazama ind. procesa	Izdvajanje parcijalnih uzoraka po svim <u>fazama procesa</u> i njihovo spajanje u Reprezentativni uzorak za svaku fazu procesa <u>Cilj:</u> ponašanje sirovine u celom procesu - izmena šema the. procesa - usavršavanje šema - usaglašavanje šema

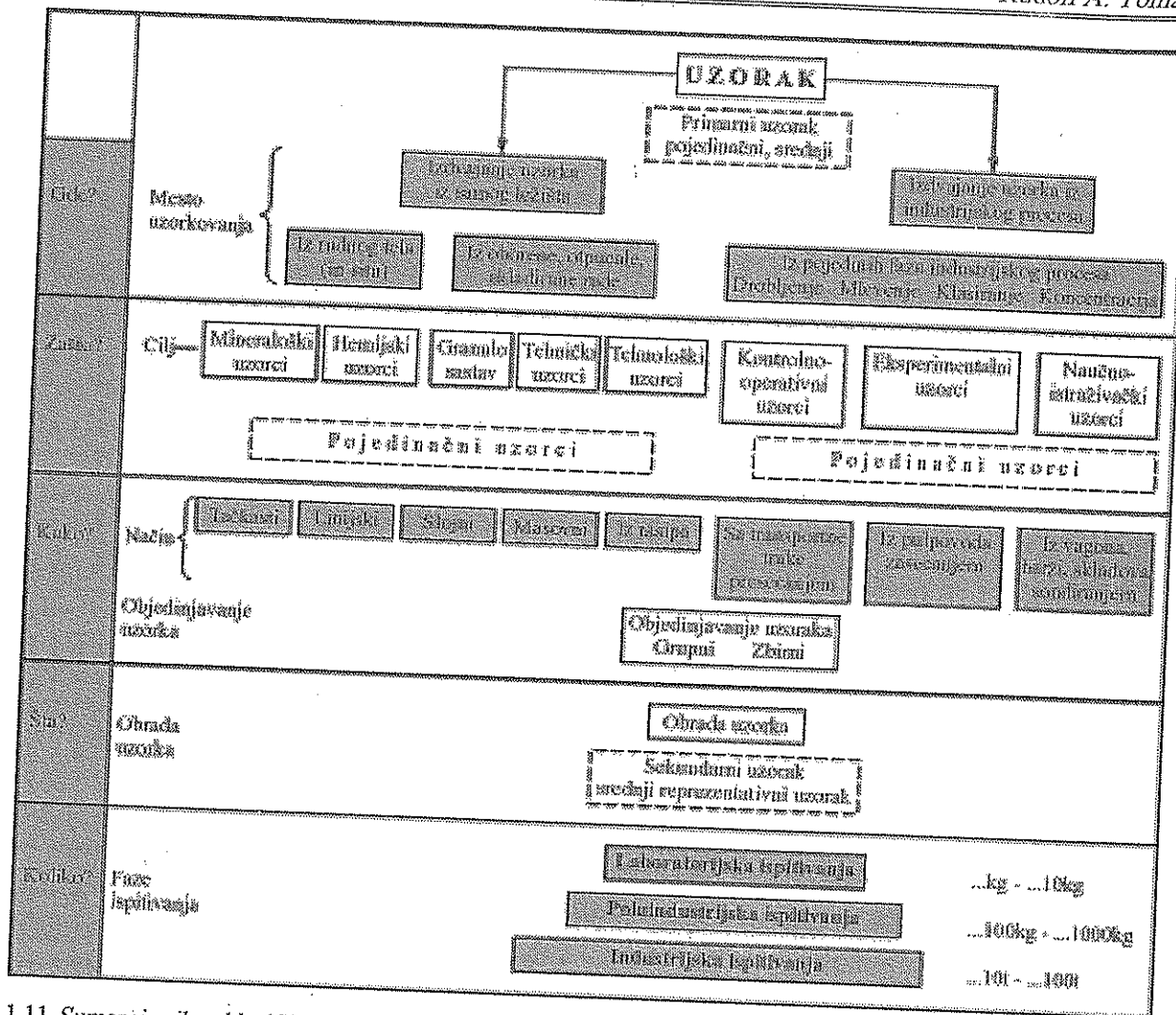
Sl.1.10 Prikaz uzorkovanja industrijskog procesa, klasifikacija i ciljevi

Prema stepenu poznavanja ležišta, odnosno tehnološkoj osvojenosti sirovine uzorkovanje se može podeliti, prema vremenu kada se vrši, na uzorkovanje u fazi prospekcijsko-istražnih radova, zatim u fazi pripremno - eksploatacionih radova i industrijsko uzorkovanje i kontrola kvaliteta (pri koncentraciji i preradi mineralnih sirovina). Uzorkovanje mineralne sirovine i proizvoda pripreme mineralnih sirovina je neophodan proces kontro-

le tehnoloških (laboratorijskih i industrijskih) procesa, kod dobijanja i pripreme mineralnih sirovina sa ciljem iskorišćenja korisnih komponenata. U tablici 1.3 dat je sumarni prikaz klasifikacija uzoraka prema karakteru postavljenih zadataka, stepenu istraženosti, mestu uzorkovanja i stanju u kome se sirovina nalazi. Na kraju upoznavanja sa uzorcima, mestu i načinu izdvajanja, slika 1.11 prikazuje sumarno ono što je izloženo o ovom pitanju.

Tablica 1.3 Sumarni prikaz klasifikacija uzoraka

Zašto?	Prema karakteru zadataka	Mineraloški uzorci
		Hemijski uzorci
		Tehnički uzorci
		Tehnološki uzorci
Kada?	Prema stepenu istraženosti i tehnološke osvojenosti	Prospekcijsko uzorkovanje
		Istražno uzorkovanje
		Eksploataciono uzorkovanje
		Industrijsko uzorkovanje
Gde?	Prema mestu uzorkovanja sirovine	Uzorkovanje ležišta na licu mesta
		Uzorkovanje sirovine (oborene, utovarene, skladiране)
		Uzorkovanje u industrijskim procesima PMS
Šta?	Prema stanju u kome se materijal nalazi	Uzorak nepokretnog materijala (oborena, skladiрана, utovarena sirovina)
		Uzorak sirovine u pokretu (sa transportne trake – zasecanjem, iz pulpovoda – presecanjem mlaza)



Sl.1.11 *Sumarni prikaz klasifikacija uzoraka prema karakteru postavljenih zadataka uzorkovanja, stepenu istraženosti ležišta i osvojenosti sirovine, mestu uzorkovanja i stanju u kome se sirovina nalazi*

1.2.2 IZBOR METODE UZORKOVANJA

Izbor metode kojom će se određeni uzorci prikupljati zavisi o nizu faktora čije su glavne grupe prikazane u narednoj tablici 1.4.

Tablica 1.4 Pregled faktora koji utiču na izbor metode uzorkovanja

Opšti faktori	Cilj uzorkovanja
	Obim radova
	Stanje u kome se javlja materijal (sirovina)
	Stepen istraženosti ležišta
	Tehnološka osvojenost sirovine
	Ekonomičnost i operativnost
Geološki faktori	Tačnost uzorkovanja
	Tip ležišta
	Moćnost rudnog tela
	Razmere rudnih tela
	Sklop i fizičke osobine sirovine
	Tvrđina sirovine
	Ravnomernost orudnjenja

Kako i koje količine pojedinih vrsta uzoraka će se prikupljati zavisi od sledećih opštih karakteristika (faktora):

- **Hemijskog sastava sirovine**, naročito sadržaja osnovnih i pratećih korisnih komponentata. Siromašne kao i bogate sirovine moraju biti predstavljene posebnim, svaka za sebe, uzorcima. Korisno je prikupiti uzorke i iz takozvanih vanbilansnih ruda sa ne ekonomičnim sadržajem korisne komponente (metala). Sadržaj štetnih primesa (na pr. fosfora, arsena i drugih u rudama gvožđa) takođe će u mnogome uticati na postupke pripreme mineralnih sirovina.
- **Mineralnog sastava**, racionalne analize ili faznog sastava. Ukoliko u ležištu postoje partije rude oksidnih, sulfidnih ili karbonatnih minerala svaka od njih mora biti predstavljena posebnim - odgovarajućim uzorcima.
- **Okolorudnih, pratećih stena - jalovine**, ukoliko se bitno razlikuju. Tako na primer rude Pb-Zn mogu da za ležu jednim delom u krečnjačkim stenama ili pak da krečnjaci preovlađuju, dok u drugim delovima ležišta ruda može biti vezana za silikatnu jalovinu, barit ili neke druge minerale, što će svakako zahtevati i različite postupke i uslove kod procesa pripreme mineralnih sirovina (izmene tehnoloških šema, kompleksna valorizacija).
- **Fizičkih karakteristika uzoraka**, prvenstveno granulometrijski sastav. Uzorci rude iz horizonata izloženih

snažnoj oksidaciji ili formiranju značajnih količina materijala supergene alteracije, na primer glina i drugih, moraju biti prikupljeni posebno - odvojeno od uzoraka masivne, tvrde rude. Ovakve pojave, glinovitih ruda zajedno sa masivnim rudama, često susrećemo u ležištima gvožđa, mangana, bakra i ležištima fosforita.

• Teksturnih obeležja, tj. međusobnih prostornih odnosa rudnih minerala i njihovih agregata u rudnoj masi, kao i strukturnih karakteristika rude u tim slučajevima kada ovi faktori kontrolišu načine srastanja i krupnoću zrna.

1.3 METODE IZDVAJANJA PARCIJALNIH UZORAKA U INDUSTRIJSKIM PROCESIMA

Sa prvim koracima u istraživanju jednog ležišta prikupljaju se i uzorci radi upoznavanja njegovog kvaliteta. U fazi prospekcije uzorci mogu biti i orijentacioni, sastavljeni od pojedinih komada, uzetih bez nekog određenog sistema. Već u fazi prospekcijsko-istražnih i istražnih radova, a pogotovo u fazi pripreme ležišta za otkopavanje, prikupljeni uzorci morali bi, sa određenim približenjima, da reprezentuju kvalitet uzorkovanog materijala, drugim rečima da su to srednji uzorci. Metode prikupljanja uzoraka u fazi eksploatacije skoro se ne razlikuju mnogo od onih koje se koriste pri detaljnom istraživanju ležišta; razlika se očituje najviše u zadacima i putevima njihovog ostvarivanja. Prema karakteru postavljenog zadatka, svi vidovi uzorkovanja u fazi eksploatacije i prerade mogu se svrstati u nekoliko grupa:

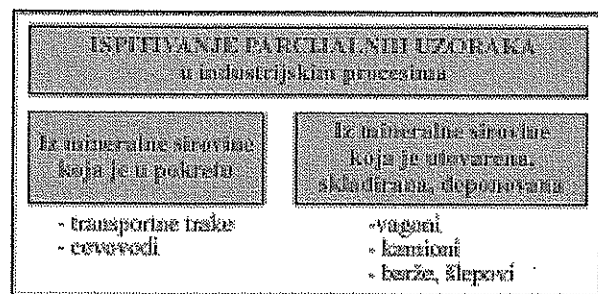
- operativno uzorkovanje
- kontrolno uzorkovanje
- eksperimentalno uzorkovanje.

Među tim uzorkovanjima otkopane rudne mase kao i uzorkovanje u fazi podnalne tehnološke osvojenosti sirovine radi određivanja kvaliteta mineralnih sirovina i proizvoda PMS razlikuje se u mnogome od uzorkovanja rude u samom ležištu (in situ).

Postupci izdvajanja parcijalnih uzoraka u industrijskim procesima mogu da se podelu u dve osnovne grupe:

□ Metode uzorkovanja iz mineralne sirovine koja je u pokretu (transportne trake, cevovodi-pulpovodi);

□ Metode uzorkovanja iz mineralne sirovine koja je utovarena, skladištena, deponovana (gomile, vagoni, kamioni, barže, šlepovi) (sl.1.12).



Sl.1.12 Metode izdvajanja uzoraka u industrijskim procesima prema stanju sirovine.

Pre samog postupka uzorkovanja sirovina i proizvoda koncentracije bilo jednokratnog, generalnog ili sistematskog neophodno je:

- utvrditi cilj uzorkovanja;
- prema postojećim podacima prethodno sagledati karakteristike uzorkovanog materijala;
- izračunati minimalnu potrebnu količinu i odrediti neophodnu masu uzorka;

- izračunati broj pojedinačnih uzoraka;
- odabrati metod uzorkovanja;
- odrediti moguću masu primarnog uzorka, polazeći od minimalne i neophodne mase uzorka, broja pojedinačnih uzoraka, načina uzorkovanja i mogućeg obima svakog pojedinačnog uzorka;
- sastaviti šemu i grafik uzorkovanja;
- sastaviti šemu pripreme i obrade primarnog uzorka;
- pripremiti sredstva i pribor za izdvajanje i skraćivanje uzoraka;
- sastaviti uputstva za izdvajanje i pripremu uzorka i sprovesti ih do realizacije.

1.3.1 KLASIFIKACIJA MATERIJALA KOJI SE UZORKUJU

Materijali, koje treba uzorkovati, moguće je klasifikovati prema različitim obeležjima: agregatnom stanju (tvrdi, tečni i gasoviti); uslovima u kojima se nalazi materijal koji se uzorkuje (nepokretni skladišteni, odnosno odloženi ili pokretni na transportnim trakama, u pulpovodima i kanalima) i granulometrijskim karakteristikama (krupnozrni, fino izmleveni materijal, pulpa).

Klasifikacija materijala po prvom obeležju - prema agregatnom stanju, je najracionalnija jer se zavisno od agregatnog stanja značajno razlikuju metodi i pribori prikupljanja uzoraka. Kod izdvajanja uzoraka u industrijskim procesima mogu se razmotriti principi i uslovi uzorkovanja čvrstih mineralnih sirovina, koje nalazimo u suvom stanju, u vidu pulpe ili u vidu tečnosti.

Metode uzorkovanja materijala, koji su odloženi i skladišteni, kao nepokretni, značajno se razlikuju od metoda uzorkovanja sirovine koja je u pokretu, koja se kreće kanalima, cevovodima. Na izbor metode uzorkovanja značajno utiče i krupnoća sipuće mase. Prema tome, pri klasifikaciji metoda uzorkovanja - krupnoća materijala mora se imati u vidu. Prihvatajući gore izneto, klasifikacija materijala koji se uzorkuje, može se izvesti na sledeći način:

□ Materijal odložen na skladovima i deponijama:

krupnokomadast

kao oborena rudna masa;

kao utovarena masa u vagone ili barže;

sitno samleven

odložen i deponovan (jalovište);

materijal u vagonima ili bunkerima (koncentrati);

skladišten materijal u buradima;

□ Materijal u transportu (utovar, istovar, premeštanje):

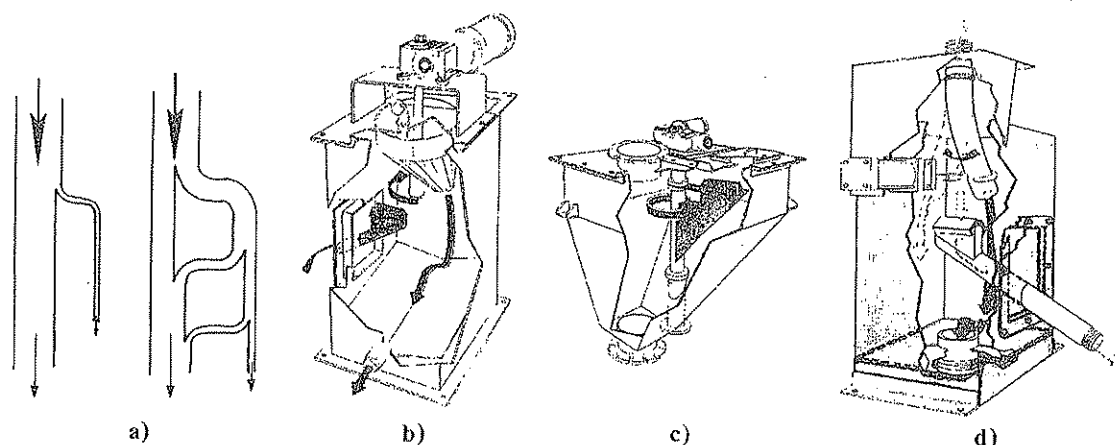
krupnozrni suvi (trake, sipke);

fino mleveni u vidu pulpe (pulpovodi, kanali).

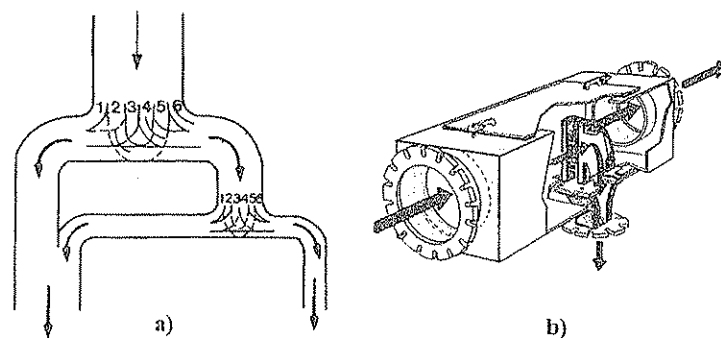
1.3.2 METODE IZDVAJANJA UZORAKA U INDUSTRIJSKIM PROCESIMA

Treba istaći da je uzorkovanje krupnokomadastog materijala, nezavisno od toga nalazi li se u pokretnom stanju ili je odložen, teže nego uzorkovanje sitnosamlevenog, zbog svoje nejednorodnosti i neophodnosti izdvajanja uzoraka velikih masa. Zbog toga su uzorci krupnokomadastog materijala manje tačni nego uzorci sitnozrnog rastresitog materijala. Stoga, ukoliko je to moguće i tehnički izvodljivo, uzorkovanje treba izvršiti nakon usitnjavanja (mlevenja) sirovine. U slučaju uzimanja uzoraka sitnozrnog (samlevenog) materijala, u vidu pulpe, najčešće se u svetu koriste uređaji kao na slici 1.13 a, b, c, d.

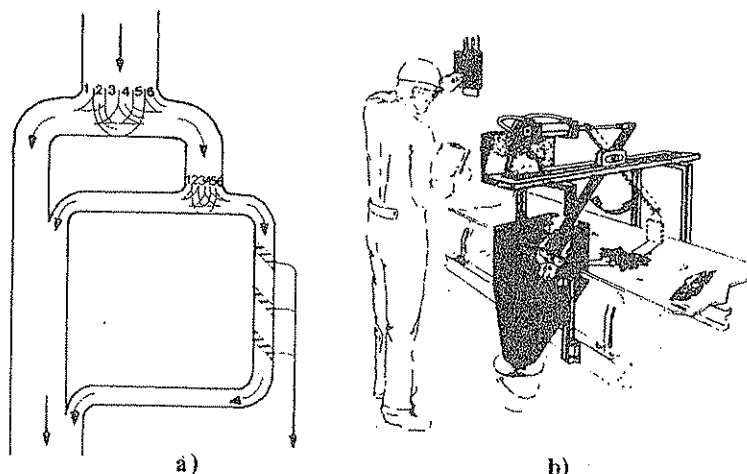
Uzorkovanje nepokretnog (skladiranog) materijala (ulaza, proizvoda koncentracije) izvodi se parcijalnim sistematskim izdvajanjem manjih količina ili komada, odbijanjem komada, presecanjem brazde, kanala, skidanjem sloja i na druge načine, kako je već ranije objašnjeno. Uzorkovanje materijala, koji je u pokretu (transportne trake, cevovodi sa pulpom) izvodi se poprečnim presecanjem toka ili mlaza, uzdužnim zasecanjem, ili kombinacijom uzdužno-poprečnih presecanja, toka, odnosno mlaza materijala. Primer uzdužnog i uzdužno-poprečnog zasecanja toka sirovine u pokretu prikazan je na sl.1.14 i sl.1.15.



Sl.1.13 a – Uzdužni presek cevovoda način i mesto uzorkovanja sa varijantama; b – Kontinualno uzorkovanje pulpe, presecanjem mlaza, sa istovremenim skraćivanjem uzoraka; c – Vezinov rotacioni uzimač uzoraka, kontinualnog dejstva; d – Uzorkovanje pulpe pomeranjem fleksibilnog pulpovoda i presecanjem mlaza.



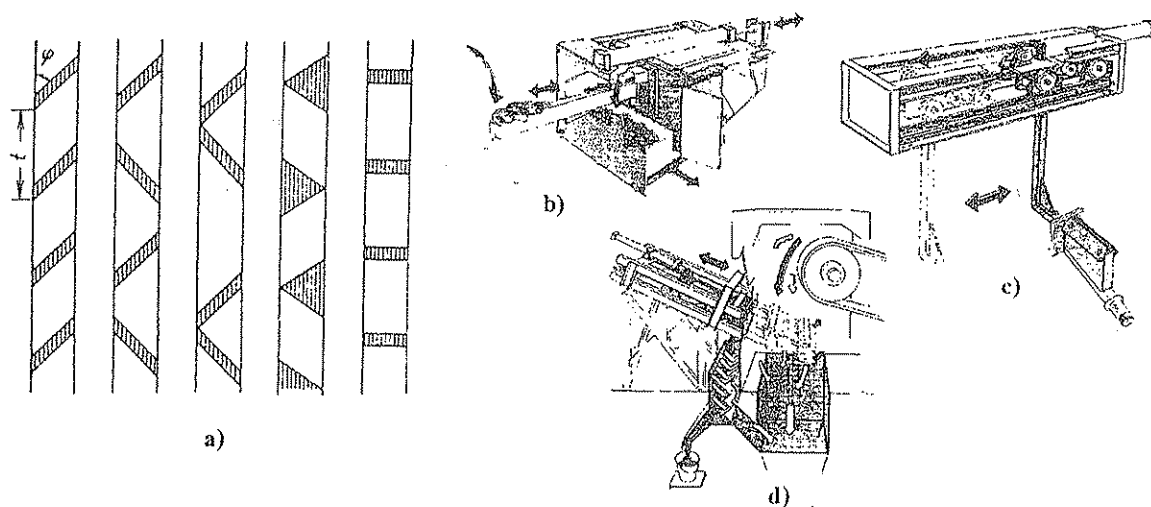
Sl.1.14 a – Uzdužno-paralelni presek cevovoda i način uzorkovanja; b – sečenje mlaza u pulpovodu.



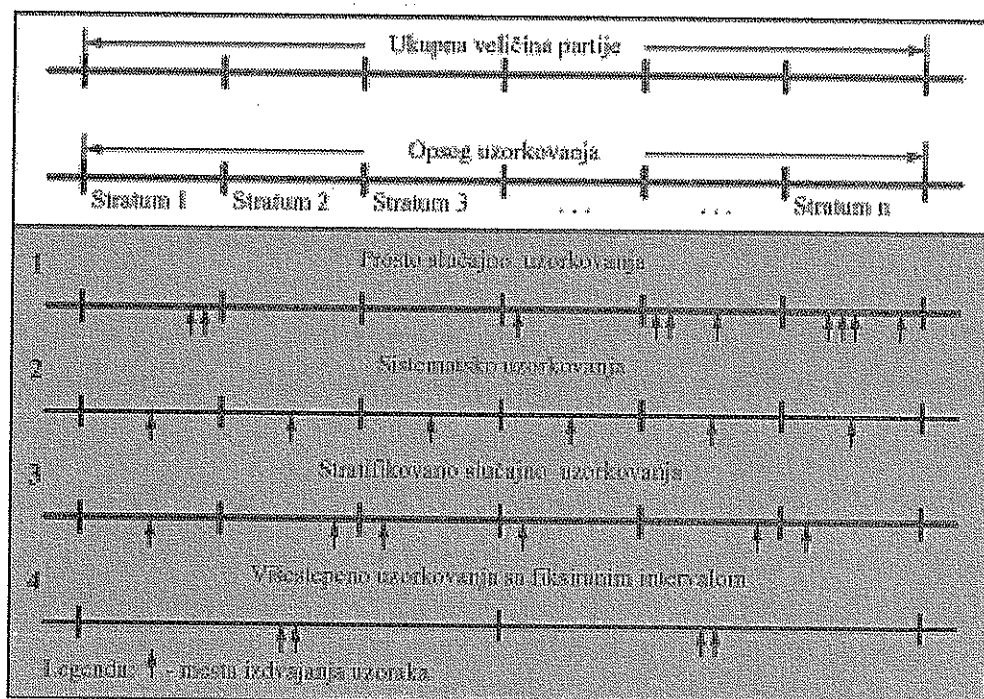
Sl. 1.15 Uzdužno i uzdužno-poprečno zasecanje toka sirovine u pokretu.

Ovaj način uzorkovanja se sastoji u tome da se iz protoka materijala koji se uzorkuje, nekim mehaničkim uzimačem, zahvata jedna ili više porcija materijala. Uzdužno zasecanje toka pulpe (prikazanog na sl.1.13), kao postupka uzorkovanja, koristi se kod relativno jednorodnog materijala (kako po sastavu tako i po krupnoći). Uzorci izdvojeni postupkom uzdužno-poprečnog presecanja mlaza smatraju se mnogo pouzdanijim. Poprečno zasecanje toka sirovine (sl.1.16) je uz dovoljno odgovarajuću učestalost, jedan od najtačnijih postupaka uzorkovanja. U ovom postupku se uzorkovani tok kretanja sirovine periodično, u zadatom vremenskom intervalu, zahvata određenim uzimačem ili jednostavno zahva-

ta lopatom. Na ovaj način se izdvajaju pojedinačni uzorci. Na sl.1.16 a je prikazano preseca-nje toka kretanja materijala (transportna traka) nekim mehaničkim uzimačem uzorka koji preseca tok samo u jednom smeru pri stalnoj brzini u tačno zadatom vremenskom intervalu, dok je na sl.1.16 b, c, d, i e, zasecanje izvedeno u dva smera. Sam ugao zasecanja toka zavisi od brzine kretanja trake i brzine kretanja uzimača. Najpouzdanije i najtačnije uzorkovanje omogućuju mehanički i automatski način izdvajanja uzoraka tokom poprečnog presecanja toka. Primeri mehaničkih uzimača uzoraka na mestu presipanja materijala dati su na sl.1.16 f, g i h.



Sl.1.16 Uzorkovanje poprečnim presecanjem na transportnim trakama, sa varijantama: a, b, c, d, e – uzorkovanje presecanjem mlaza (linearni uzorkivač firme Heath & Sherwood (1964) Limited, Canada); f, g – uzorkovanje zasecanjem mlaza po celoj širini, na presipnom mestu trakastog transportera sa mogućnošću istovremenog skraćivanja žljebastim razdeljivačem (firme Heath & Sherwood (1964) Limited, Canada).; h – sandučasti uzorkivač za izdvajanje sirovine na presipnom mestu (firme Heath & Sherwood (1964) Limited, Canada).



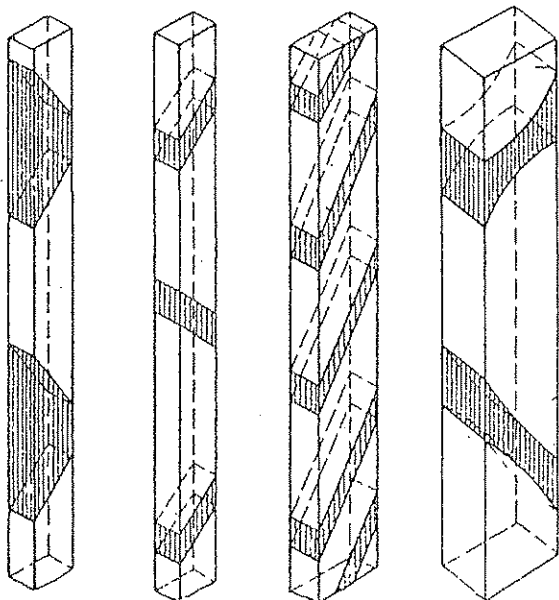
Sl.1.17 Ilustracija standardnih metoda izdvajanja uzoraka; 1 – Prosto slučajno uzorkovanje; 2 – Sistematsko uzorkovanje; 3 – Stratifikovano slučajno uzorkovanje; 4 – Višestepeno uzorkovanje sa fiksnim intervalom.

Zasecanje toka sirovine, na presipnim mestima - kod transporta pokretnim trakama, može da se vrši na više načina. Na narednim slikama su ilustrovani tipovi uređaja za izdvajanje uzoraka.

Pored sistematskog izdvajanja uzoraka, u teoriji uzorkovanja poznati su i drugi principi standardnog uzorkovanja konačne populacije, mada se oni ređe primenjuju u ovoj oblasti nauke i delatnosti. Znači, uzorkovanje zasecanjem mlaza može da se izvede:

- metodom sistematskog uzorkovanja (sa kojom smo se već ranije upoznali) i koja se najčešće koristi;
- metodom prostog slučajnog uzorkovanja;
- metodom stratifikovanog uzorkovanja, gde subpopulaciju čine stratumi (partije, celine), a svaki od njih se uzorkuje metodom slučajnog uzorka;
- metodom višestepenog uzorkovanja.

Na sl.1.17 prikazane su četiri metode uzorkovanja materijala. Gde je ukupna veličina partije, koja predstavlja opseg uzorkovanja, izdvojena na stratumu.



Sl.1.18 Trodimenzioni prikaz formi presecanja materijala pri uzorkovanju različitim uzimačima

Mehanički način uzorkovanja se vrši mehaničkim uzimačima uzoraka koji se postavljaju na mestima gde se materijal presipa sa jednog na drugi transportni uređaj. Mehanički način uzorkovanja ulazne sirovine, koja ulazi u industrijski proces vrši se na takozvanim stanicama za izdvajanje uzoraka ili tačkama sa mehaničkim uzimačima pulpe nakon mlevenja. Pojedinačni uzorci izdvojeni mehaničkim uzimačima, za sve partije sirovine, spajaju se na jednom mestu i predstavljaju zajednički, srednji uzorak.

Kod ručnog načina izdvajanja uzoraka sa nasute, skladirene sirovine treba da se vrši parcijalno u toku stvaranja konusa - gomile. Nakon nasipanja jedne trećine materijala sa površine kupe se izdvaja jedna trećina ukupnog broja pojedinačnih uzoraka; nakon nasipanja druge trećine materijala izdvoji se još jedna trećina pojedinačnih uzoraka i posle nasipanja celokupnog materijala izdvoji se poslednja trećina pojedinačnih uzoraka. Tačke uzimanja pojedinačnih uzoraka se postavljaju na ofomljenom konusu tako da su u međusobnom odnosu od 120°

jedna prema drugoj, s tim da su pri svakom stadijumu uzimanja pomerene za 40° u jednu stranu. Zatim se postupak ponavlja za sledeću fazu formiranja kupe odnosno dodavanja druge i treće trećine materijala (Sl. 1.19). Pri formiranju kupe, kod ovoga ali i drugih postupaka homogenizacije i izdvajanja primarnih uzoraka sirovine, važno je istaći pojavu segregacije materijala po krupnoći (Sl.1.19 d). Segregacija komada ili zrna po krupnoći može bitno da utiče na tačnost samog uzorkovanja.

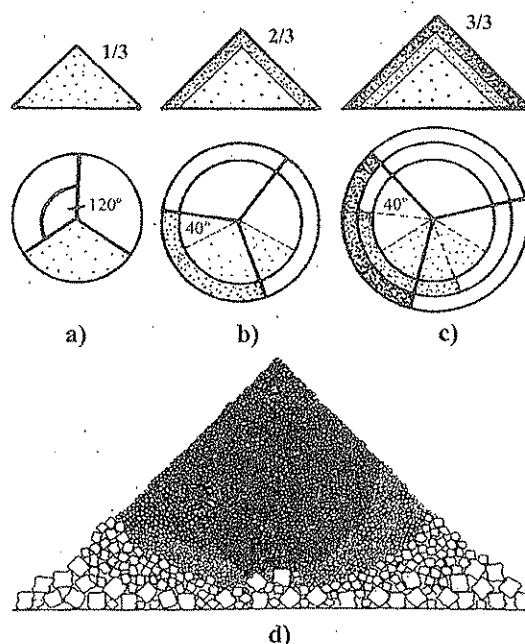
N. Barišev preporučuje da se u pojedinim slučajevima kod uzorkovanja značajnijih masa mineralnih sirovina primenjuje mrežasto-tačkasta metoda kombinovana sa metodom kupe. Ova metoda se sastoji u sledećem:

1. Uzorkovanje se vrši u toku odlaganja - skladiiranja mineralne sirovine;

2. Kada se odloži $1/8$ do $1/10$ ukupne mineralne sirovine, sipane na gomilu odnosno kupu, izvrši se razvlačenje u pogaču. Prečnik ove pogače zavisiće od količine materijala odnosno njene visine. Naravno, teže je izdvojiti reprezentativan uzorak što je debljina pogače veća. Svaki pojedinačni uzorak treba da se sastoji od materijala koji je uzet po celoj moćnosti na datom mestu;

3. Pošto je formirana pogača sa nje se po određenoj mreži izdvajaju pojedinačni uzorci. Mreža je najčešće kvadratna, a uzorci se izdvajaju iz sredine kvadrata. Masa pojedinačnih uzoraka zavisiće od krupnoće materijala i stepena neravnomernosti. U narednoj tablici 1.5 su prikazani podaci o broju pojedinačnih uzoraka i njihovoj masi za slučaj da je uzorkovana komponenta neravnomerno ili krajnje neravnomerno raspoređena u mineralnoj sirovini. Podaci su orijentacioni.

4. Pošto je na ovaj način izdvojen uzorak iz $1/8$ ili $1/10$ ukupne mase za koju treba odrediti srednji sadržaj neke komponente, materijal se odlaže a na njegovo mesto se doprema ista količina materijala. Proces se ponavlja potpuno isto kao i u prvom slučaju. Na taj način se izvrši uzorkovanje iz celokupne mase. Koji će deo rúdne supstance biti zahvaćen uzorkovanjem u jednoj fazi - ciklusu, zavisi od ukupne količine materijala iz koje se izdvajaju uzorci. Za jednu fazu treba izdvojiti toliko materijala da se od kupe obrazuje pogača sa dimenzijama koje su pogodnije za rad tokom uzorkovanja.



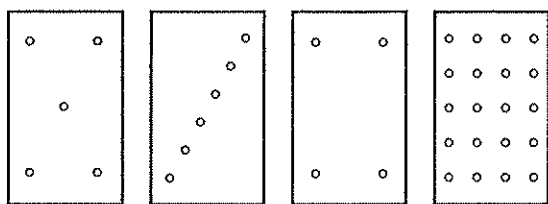
Sl. 1.19 Šema uzorkovanja materijala nasutog u formu kupe.

Tablica 1.5 Određivanje broja pojedinačnih uzoraka i njihova masa, zavisno od karakteristika orudnjenja i krupnoće (po N. Bariševu)

Karakter orudnjenja	Krupnoća materijala, mm					
	0 – 5 mm		5 – 12 mm		12 – 30 mm	
	Broj pojedinačnih uzoraka	Masa, kg	Broj pojedinačnih uzoraka	Masa, kg	Broj pojedinačnih uzoraka	Masa, kg
Neravnomeran	80	2,5–3	110	4–5	150	6–7
Veoma i krajnje neravnomeran	100–120	3–4	140–180	5–6	300–400	7–8

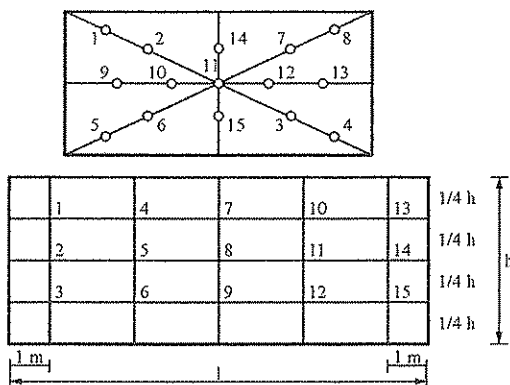


Tačke izdvajanja pojedinačnih uzoraka rude ili proizvoda koncentracije, koji se nalaze u željezničkim vagonima ili transportnim sredstvima sličnog oblika, kod ručnog uzorkovanja, treba da su razmeštene po određenoj mreži (Sl.1.20 i Sl.1.21). U svim slučajevima tačke uzimanja pojedinačnih uzoraka treba da su tako postavljene da su najmanje 0,5 m udaljene od ivice vagona odnosno da su udaljene bar 1/3 poluprečnika radijusa od ivice, ukoliko se materijal transportuje u okruglim kontejnerima.



Sl.1.20 Različite mreže izdvajanja uzoraka iz vagona, vagoneta ili šlepova

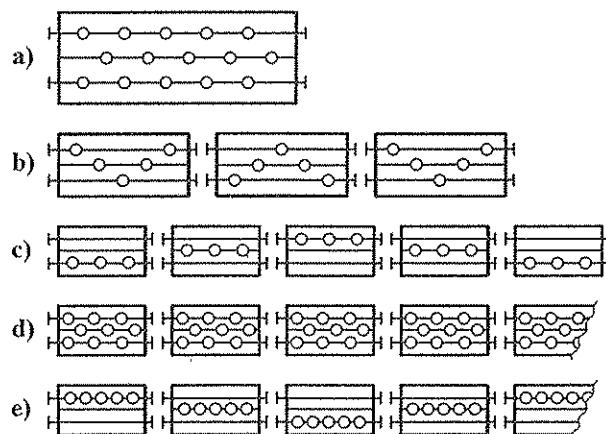
U slučaju različite nosivosti transportnih sredstava, koji ulaze u jednu partiju - celinu, ukupna količina (broj) pojedinačnih uzoraka se raspoređuje proporcionalno kapacitetu tih transportnih sredstava. Tako imamo, ilustrovano na slici 1.22: a) 15 tačaka u jednom vagonu; b) 15 tačaka u tri vagona; c) 15 tačaka u pet vagona; ili slučaj d) 54 tačke u šest vagona; e) 100 tačaka u dvadeset pet vagona.



Sl.1.21 Primeri šema rasporeda tačaka kod izdvajanja pojedinačnih uzoraka iz željezničkih vagona

Pri ručnom izdvajanju uzoraka treba se pridržavati određenih pravila. Izdvajanje uzoraka mineralne sirovine ili koncentrata, krupnoće 50 mm i sitnije, pojedinačni uzorci se prikupljaju iz tačaka na određeni način postavljene mreže uzorkovanja. Pojedinačni uzorci se uzimaju iz

prethodno pripremljenih rupica, jamica dubine 0,2–0,4 m. Po rubovima tih jamica odozdo na gore u pravoj liniji lopaticom određenih dimenzija zahvata se materijal jednom ili dva puta, zavisno od potrebne količine. Sadržaj lopatice se sipa u kofu ili sličan sud. Pri ovome posebnu pažnju obratiti da srednja vrednost granulometrijskog sastava pojedinačnih uzoraka bude slična sastavu materijala koji se uzorkuje, a naročito u sadržaju klasa -50+10 mm i -10+0 mm. Materijal sa dna jamica nije preporučljivo uzimati. Kod izdvajanja uzoraka iz sitnozrnih sirovina i koncentrata, krupnoće ispod 6 mm, pojedinačni uzorci se uzimaju sondom ili iz prethodno načinjenih jamica, dubine 0,2 do 0,4 m, ukoliko je materijal u smrznutom stanju (Sl.1.21 i Sl.1.22).



Sl.1.22 Primeri različitih rasporeda tačaka uzorkovanja iz željezničkih vagona ili barži; a-15 tačaka po jednom vagonu; b-15 tačaka iz tri vagona; c-15 tačaka uzorkovanja iz pet vagona; d-raspored 54 tačke uzorkovanja iz šest vagona; e-100 tačaka uzorkovanja iz 25 vagona (A. L. Sagradyan, 1983.).

Izdvajanje uzoraka kod krupnokomadastih sirovina pojedinačni uzorci treba da se prikupljaju proporcionalno udelu komada (klasa krupnoće) u tri klase krupnoće: materijal krupnoće ispod 10 mm; materijal srednje krupnoće do 50 mm; i krupnokomadasti materijal iznad 50 mm. Uzorkovanje materijala koji sadrži iznad 5% komada krupnijih od 50 mm treba da se vrši pomoću čekića i lopatice. Iz krupnokomadastog materijala rude pojedinačni uzorci treba da se prikupe odbijanjem, odlamanjem, čekićem komada dimenzija do 50 mm, ovakve komade koji se uzimaju sa određenih tačaka treba uzimati zaredom (ne birati bogatija mineralizovana mesta).

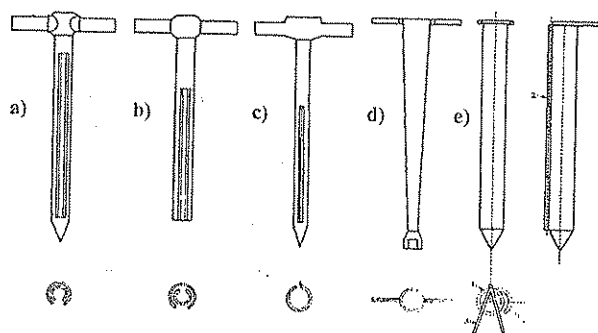
Iz očigledno ne jednorodnih komada neophodno je odlamati, odbijanjem, veću količinu materijala (komada) nego kod odbijanja kod jednorodnih ravnomerno mineralizovanih sirovina. Ukupna masa odbijenih ko-

mada u uzorku treba da bude proporcionalna masi krupnogradaste klase uzorkovane sirovine. Pojedinačni uzorci izdvojeni iz sitnozrnih, srednje zrnih i krupno komadastih klasa treba objediniti sastavljajući kompozitni uzorak.

Pri uzorkovanju većih masa sirovine ili koncentrata skladištirane ili deponovane na jednom mestu, a čija je debljina sloja ispod 1,5 m visine, treba da se uzorkuje tako što se ukupna površina podeli na kvadrate čiji broj treba da je jednak broju pojedinačnih uzoraka a izdvajanje tih pojedinačnih uzoraka vrši se iz jamica napravljenih u centru svakog od pomenutih kvadrata. Pri visini sloja skladištiranog ili deponovanog materijala čija je visina veća od 1,5 m uzorkovanje treba obaviti u toku procesa deponovanja materijala (po fazama popunjavanja) a ne kada se proces odlaganja završi; ili za vreme nasipanja materijala; ili u procesu premeštanja materijala sa tog mesta (frakciono uzorkovanje). U slučaju da je materijal skladišten u vidu sitnozrne sirovine ili koncentrata dozvoljava se njegovo uzorkovanje putem sondiranja (Sl.1.23) sa površine skladova i izdvajanjem pojedinačnih uzoraka sa sredine svakog metra bušotine (sonde).

1.3.3 PRIBOR ZA IZDVAJANJE UZORAKA

U industrijskim postrojenjima za PMS uzorci se mogu izdvajati ručno, pomoću različitog pribora za uzorkovanje ili mehanički automatskim uzorkivačima.



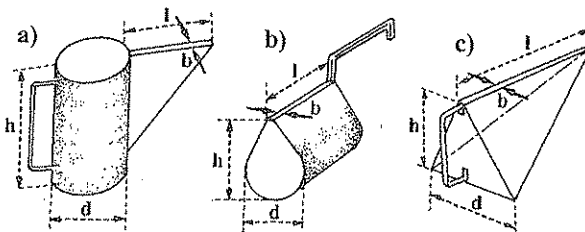
Sl.1.23 Tipovi sonde za uzorkovanje sitnozrnog i rastresitog materijala (a-sonda sa dvostrukom cevi i konusnim vrhom; b-dvostruka sržna cev; c-sonda sa uzdužnim prorezom za ulazak materijala u cev; d-sonda za konsolidovani materijal; e-sonda koju čine dve polovine cevi vezane šarkom).

Ručni pribor, uzimači i skraćivači uzoraka moraju da zadovolje sledeće:

- slobodan prolaz komada ili čestica u prorez suda za manuelno izdvajanje uzoraka ili hvatača mehaničkog uređaja tokom presecanja mlaza, koji treba da bude bar 2,5 puta veći od najkrupnijih komada - čestica;
- odgovarajuću učestalost, odnosno kapacitet primenjenog pribora za uzorkovanje u skladu sa ukupnom količinom materijala koji se uzorkuje;
- stalnu brzinu presecanja mlaza pulpe ili toka kretanja sirovine odgovarajućim priborom tako da ne dolazi do rasipanja ili ispadanja materijala iz suda kao i da se sud ne prepuni; put kretanja treba da je dovoljno dug da bi se mlaz odnosno tok kretanja sirovine, pri presecanju, zahvatio potpuno;

- da se obezbedi paralelnost kretanja uređaja uzorkivača sa pravolinijskim kretanjem sirovine,
- jednostavan pristup uređajima i priboru radi kontrole i pražnjenja.

Pribori, sudovi za izdvajanje uzoraka presecanjem mlaza, prikazani su na slici 1.24.



Sl.1.24 Specijalni sudovi za zasecanje i presecanje mlaza pulpe (samlevene sirovine, koncentrata, jalovine).

1.3.4 ZAKONITOSTI I PARAMETRI UZORKOVANJA

Parametri koji definišu uzorkovanje ispoljavaju se kroz: broj i masu pojedinačnih uzoraka, čijim se objedinjavanjem dobija kompozitni uzorak, kao i minimalnom, odnosno dovoljnom masom (količinom) uzorka, do koje kompozitni uzorak može biti skraćen u svakom stadijumu njegove obrade, vodeći računa stalno o krupnoći materijala i ravnomernosti mineralizacije, zadržavajući pri tom reprezentativnost kontrolisanih karakteristika. Formula za izračunavanje broja porcija (tačaka) N pojedinačnih uzoraka može da se prikaže na dva načina

$$N = t^2 \cdot \frac{\sigma^2}{\Delta_r^2} \quad 1)$$

$$N = t^2 \cdot \frac{V^2}{\Delta_r^2} \quad 2)$$

gde su:

- t - kvantil normalne raspodele pri zadatoj verovatnoći p (t ≈ 2 pri verovatnoći p = 95%);
- σ - srednje kvadratno odstupanje sadržaja korisne komponente u uzorkovanom materijalu, %;
- V - koeficijent varijacije sadržaja korisne komponente, %;
- Δ - apsolutna greška izdvajanja uzoraka, %;
- Δ_r - relativna greška izdvajanja uzoraka, %.

Za rude gvožđa i mangana, kao i za koncentrate kod kojih se apsolutne vrednosti sadržaja osnovnih komponenta iz sirovina sa različitih ležišta menjaju u relativno uskom rasponu, češće se primenjuje prvi obrazac (1), ocenjujući ravnomernost materijala (varijaciju sadržaja) prema srednjem kvadratnom odstupanju, σ (Tablica 1.6). Za rude i koncentrate obojenih metala, sa širokim dijapazonom sadržaja korisnog metala češće se primenjuje drugi obrazac (2), pri čemu se ravnomernost mineralizacije sirovine ocenjuje prema koeficijentu varijacije sadržaja metala, V. (Tablica 1.6).

Utvrđivanje kategorije ravnomernosti mineralizacije, materijala koji se uzorkuje, određuje se eksperimentalnim putem određujući pri tome vrednosti za σ i V. U tu svrhu se uzimaju slučajni uzorci i određuju željene komponente služeći se pri tome uputstvima odgovaraju-

ćih standarda. Kod izdvajanja tovarnog uzorka za tehnološka ispitivanja sa skladova ruda i koncentrata obojenih metala broj pojedinačnih uzoraka (minimalno dovoljen broj) dobija se iz obrasca

$$N = 0,075 \cdot V \cdot \sqrt{M}$$

gde je: M - masa partije koja se uzorkuje (t).

Tablica 1.6 Klasifikacija ruda i koncentrata po kategorijama ravnomernosti mineralizacije (varijacija kvaliteta)

Kategorija ravnomernosti mineralizacije	Obojeni metali	Rude gvožđa	Rude mangana
	V. %	σ %	σ %
Veoma ravnomerna	< 13	—	—
Ravnomerna	13-20	< 1,5	< 1,0
Srednje ravnomerna	20-33	1,5-2,0	1,0-2,0
Neravnomerna	> 33	> 2,0	> 2,0

Saglasno standardima kod uzorkovanja skladiranih - nepokretnih materijala, izračunati broj pojedinačnih uzoraka, raspoređuje se ravnomerno po celokupnoj količini materijala. Broj pojedinačnih uzoraka koji se izdvaja iz jedinice transportnog sredstva kod uzorkovanja neke partije, a koja se sastoji od više elemenata (vagona, barži) približno iste mase, određuje se deobom ukupnog broja uzoraka za tu masu na ukupan broj transportnih jedinica (videli smo to na primeru uzorkovanja iz vagona).

Ukupan broj zasjecanja mlaza (broj pojedinačnih uzoraka), koji se izdvaja iz materijala, partije, koja je u pokretu (pri utovaru, istovaru, transportu), raspoređuje se vremenski ravnomerno sa intervalima T_i izdvajanja, odnosno zasjecanja mlaza, po obrascu:

$$T_i = 60 \cdot M / Q \cdot N$$

gde su:

M - masa sirovine ili koncentrata iz koje se vrši uzorkovanje (t);

Q - kapacitet uzorkovanog toka (t/h);

N - broj pojedinačnih uzoraka za datu partiju.

Razmotrićemo slučaj uzorkovanja u industrijskim procesima na primeru izdvajanja materijala sa transportne trake ulaza sirovine u mlinove. Kao što je već istaknuto, prvo, treba odrediti masu primarnog uzorka, koja treba da bude minimalno neophodna i dovoljna (Q_{prim}). Masa primarnog uzorka prema minimalnom, data je odnosnom: $Q_{prim} > Q_{min}$. Odnosno

$$Q_{prim} = m \cdot n$$

gde su:

m - masa porcije (parcijalnog, trenutnog uzorka);

n - broj porcija.

Masa jedne porcije (parcijalnog, trenutnog, tačkastog uzorka) zavisiće od ukupne mase koja se uzorkuje, kapaciteta uzimača i od brzine kretanja, u ovom slučaju, transportne trake. Tako imamo masu jedne porcije

$$m = \frac{Q \cdot b}{3,6 \cdot v} \quad (\text{kg})$$

gde su:

Q - protok mase transportnim sredstvom, (t/h);

b - širina kašike uzimača (m);

v - brzina kretanja uzimača (m/sec).

Sam broj porcija (parcijalnih, pojedinačnih, trenutnih uzoraka) može da se izračunava na više načina. Svakako da pri tome budu zadovoljeni uslovi koji su dati preko već pomenutih obrazaca 1 i 2 datih na strani 18. Iste obrasce možemo naći i u obliku

$$n = K \cdot \frac{V^2}{r^2}$$

gde su:

K - koeficijent verovatnoće tačnosti sa kojom je uzorak izdvojen: tako imamo

za K = 1 kod nivoa pouzdanosti 68,3 %

za K = 2 kod nivoa pouzdanosti 95,5 %

za K = 3 kod nivoa pouzdanosti 99,7 %

za K = 4 kod nivoa pouzdanosti 99,9 % ;

V - koeficijent varijacije sadržaja datog elementa (%);

r - dozvoljena greška, uzima se kao tačnost određivanja sadržaja datog elementa hemijskom analizom.

U slučaju da nam nisu poznate karakteristike sirovine, broj porcija se može odrediti i preko obrasca

$$n = c \cdot \sqrt{M}$$

gde su:

c - koeficijent ravnomernosti orudnjenja;

M - masa koja se uzorkuje (t).

U izvesnim slučajevima (separacija uglja) broj porcija može da se izračuna iz empirijski dobijenih podataka, kao ovaj primer dat u tablici 1.7.

Tablica 1.7 Određivanje broja porcija u zavisnosti od ukupne mase

Ukupna masa koja se uzorkuje	Broj porcija n (ne manji od datog)
≤ 300 tona	$n \leq 15$
300 – 600	1 na svakih 20 t odnosno $n = Q/20$
≥ 600 tona	$n \geq 30$

Drugi parametar koji treba odrediti, nakon što je poznat broj porcija i ukupna masa koja se uzorkuje, je vremenski interval izdvajanja (zasjecanja) parcijalnih uzoraka. Tako imamo

$$T = \frac{60 \cdot M}{Q \cdot n}$$

gde su:

M - ukupna masa koja se uzorkuje (t);

Q - protok mase transportnom trakom (t/h);

n - broj pojedinačnih porcija.

♣ Primer: sirovina, u pogonu za PMS, nakon drobljenja, transportnom trakom kapaciteta $Q=300$ t/h se doprema u mlin. Treba izdvojiti primarni uzorak ($Q_{prim} = m \cdot n$), odnosno utvrditi minimalni uzorak ($Q_{min} = k \cdot d_{max}^{\alpha}$) za tehnološka ispitivanja ako se zna da je dnevna prerada $M = 7200$ t rude, da je širina uzimača $b=0,30$ m, kao i da je brzina uzimača $v=1,5$ m/s. Krupnoća sirovine, odnosno GGK iznosi $d_{max} = 25$ mm, pa se zamenom u odgovarajuću jednačinu dobija

$$Q_{prim} = m \cdot n$$

$$m = \frac{Q \cdot b}{3,6 \cdot v} = \frac{300 \cdot 0,30}{3,6 \cdot 1,5} = 16,7 \quad (\text{kg})$$

Pošto je prerada pogona $M=7200$ t/dan rovne rude znači da treba uzeti bar 30 porcija ($n=30$).

Vremenski interval izdvajanja

$$T = \frac{60 \cdot M}{Q \cdot n} = \frac{60 \cdot 7200}{300 \cdot 30} = 48 \text{ min}$$

Sledi da će primarni uzorak iznositi $Q_{\text{prim}} = m \cdot n = 16,7 \cdot 30 = 501 \text{ kg}$. Za ovaj tip sirovine minimalna (reprezentativna) količina uzorka iznosi:

$$Q_{\text{min}} = k \cdot d_{\text{max}}^3 = 0,2 \cdot 25 = 125 \text{ kg.}$$

1.4 FAKTORI ODREĐIVANJA MINIMALNE KOLIČINE UZORKA

Iz svake sitnozrne ili krupnokomadaste mase skladiране ili u pokretu (suve ili u obliku pulpe), (transportne trake, cevovodi) moguće je izdvojiti neku određenu (minimalno dozvoljenu), manju, količinu materijala, koja će još uvek imati očuvana data fizička ili hemijska svojstva, odgovarajuća polaznom materijalu sa koje je uzeta. Ova ograničena količina materijala čini **minimalnu masu uzorka**. *Svaki uzorak, srednji ili reprezentativan, dobijen u bilo kom stadijumu skraćivanja, mora da ima masu koja nije manja od minimalno potrebne (i neophodne) količine.*

Narušavanje nepromenljivosti sadržaja ispitivanih komponenata (metala, minerala) pri postepenom skraćivanju primarnog uzorka može biti uslovljeno neproporcionalnom raspodelom sastavnih elemenata uzorka. Na ovaj način, greška, koja nastaje pri skraćivanju uzorka na dva dela, uslovljena je viškom ili nedovoljnom količinom, brojem komada ili zrna mineralne sirovine u jednom delu uzorka u poređenju sa drugim delom, pri čemu je ova greška, za datu masu uzorka utoliko veća, što su komadi sirovine u uzorku krupniji. Očigledno je, prema tome, da minimalno dovoljna masa uzorka pri dozvoljenoj grešci, pre svega zavisi od razmera komada u smesi. Zato je neophodno imati znatno veću količinu, odnosno veći ukupan broj komada u uzorku, da eventualni gubitak ili višak nekih komada (količina) tokom skraćivanja, ne bi mogao promeniti sadržaj korisne komponente od nekog, praktično dozvoljenog nivoa. Na složenost šeme obrade, skraćivanja uzorka najveći uticaj ima **masa primarnog uzorka**. Prema tome, teži se, pri formiranju uzorka, minimalne mase, ka ne narušavanju njegove reprezentativnosti.

1.4.1 PRIMARNI UZORAK

Na veličinu primarnog uzorka utiču sledeći značajni faktori.

① **Homogenost, ravnomernost orudnjenja rudne mase.** Rude, iz različitih genetskih tipova ležišta mineralnih sirovina, se međusobno razlikuju po svom sklopu odnosno strukturno-teksturnim karakteristikama. Rude sa pločastom, slojevitom ili masivnom teksturom spadaju u sirovine sa ravnomernijim orudnjenjem, u odnosu na brečaste rude ili rude iz konglomerata sa vrlo krupnozrnim orudnjenjem, koje su najčešće nehomogene i spadaju u neravnomerno orudnjenje. Prema tome, masa primarnog uzorka kod prvog tipa ruda može biti relativno manja nego kod drugog. Otkopana mineralna sirovina koja je skladišana ili utovarena u transportna sredstva, je homogenija upravo zbog mešanja tokom operacija transporta i skladiaranja. Prema tome masa primarnog uzorka otkopane mineralne sirovine, po pravilu treba da bude manja nego masa uzorka prikupljenog iz rudnog tela.

② **Srednji sadržaj korisne komponente.** Masa uzorka treba da bude utoliko manja, što je srednji sadržaj korisne komponente veći. Na primer, sadržaj gvožđa u željeznim rudama iznosi nekoliko desetina procenata i masa srednjeg uzorka je nekoliko puta manja, nego masa uzorka rude bakra, u kojoj je sadržaj bakra najčešće ispod 1%.

③ **Krupnoća zrna rudnog minerala.** Masa primarnog uzorka treba da je utoliko veća što su zrna-agregati kristala rudnog minerala krupnija. Tako, masa uzorka nekih polimetaličnih ruda, čija krupnoća zrna sulfida ne prelazi 1 mm može biti 10 do 20 puta manja od količine koja je potrebna pri uzorkovanju rude iz kvarcnih žica sa krupnim zrnima volframita koja dostižu i 100 mm.

④ **Količina zrna rudnog minerala.** Što je veći broj zrna (količina) rudnog minerala u uzorku, manja je verovatnoća da će pri određivanju sadržaja date komponente doći do greške. Tako, ukoliko količina zrna rudnog minerala preovlađujuća u uzorku to će pri obradi i skraćivanju tog uzorka biti manje mogućnosti grešaka. Nasuprot, pri maloj količini zrna rudnog minerala mogućnost da dođe do greške tokom skraćivanja i obrade uzorka je mnogo veća.

⑤ **Razlika u gustinama rudnih i nerudnih minerala.** Što je razlika u gustinama rudnih i nerudnih minerala veća time bi i masa primarnog uzorka trebala biti veća.

⑥ **Red veličine srednjeg sadržaja metala u rudi.** Što je srednji sadržaj metala u sirovini veći to će biti potrebna manja količina primarnog uzorka. Količina primarnog uzorka pri istim uslovima za rude gvožđa će biti mnogo manja od uzorka rude bakra a mnogo manja u odnosu na masu uzorka zlata iz kvarcnih žica.

⑦ **Odnos sadržaja metala β u korisnom mineralu prema srednjem sadržaju metala α u uzorku,** prvenstveno zavisi od odnosa broja mineralizovanih i nemi-

neralizovanih - nerudnih zrna u uzorku.

Ako masu uzorka q predstavimo kao sumu rudnih i nerudnih zrna, ona iznosi:

$$q = n_o \cdot d_o^3 \cdot \delta_o + (N_o - n_o) \cdot d_a^3 \cdot \delta_a$$

gde su:

N_o - ukupna količina mineralizovanih zrna;

n_o - količina mineralizovanih zrna (praćenog minerala) u uzorku;

d_o - srednji prečnik zrna minerala u uzorku;

δ_o i δ_a - gustina mineralnih zrna i gustina zrna jalovine, odgovarajuće.

Srednji sadržaj metala α iznosi

$$\alpha = \frac{\beta \cdot n_o \cdot \delta_o \cdot d_o^3}{q} = \frac{\beta \cdot n_o \cdot \delta_o \cdot d_o^3}{n_o \cdot d_o^3 \cdot \delta_o + (N_o - n_o) \cdot \delta_a \cdot d_a^3}$$

iz toga sledi

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\beta \cdot [n_0 \cdot \delta_b \cdot d_0^3 + (N_0 - n_0) \cdot \delta_0 \cdot d_0^3]}{\beta \cdot n_0 \cdot \delta_b \cdot d_0^3} = 1 + \frac{\delta_0}{\delta_b} \cdot \frac{N_0 - n_0}{n_0}$$

gde je β - sadržaj metala u korisnom mineralu.

Pre svega da vidimo šta sve utiče na odnos β/α . Iz svega toga sledi da veličina β/α prvenstveno zavisi od odnosa n_0 rudnih i $(N_0 - n_0)$ nerudnih mineralnih zrna u uzorku kao i od njihove krupnoće.

Za rude željeza $\beta/\alpha = 1 - 2,5$; za rude obojenih metala 25-50 i za rude retkih i plemenitih metala 50 - 200.

Sa povećanjem broja mineralizovanih (rudnih) zrna u uzorku verovatnoća pojave greške se umanjuje, dok pri preovlađujućem broju mineralnih zrna u procesu skraćivanja je moguće ravnomernije raspodeliti korisni mineral. Povećanjem potrebe tačnosti hemijskih analiza neophodno je uvećati i masu analiziranog uzorka. Dovoljna greška zavisi, takođe i od sadržaja korisnih komponenata u uzorku; sa povećanjem sadržaja njihova apsolutna greška se povećava, a relativna smanjuje. Tako, pri sadržaju bakra u rudi od nekoliko procenata, dovoljna greška iznosi 0,25% abs., a pri sadržaju u delovima procenta ona iznosi 0,1% abs.

1.4.2 SEKUNDARNI UZORAK

Kao što smo videli, u delu koji obrađuje metode prikupljanja uzoraka, primarni uzorak iz samog ležišta ili pogona za PMS može da bude znatnije mase. Tako relativno velike količine materijala moraju biti smanjene i svedene na meru, pri odgovarajućoj obradi uzorka, koja će biti pogodna za dalji rad u laboratorijama. Količina materijala koja je neophodna za formiranje "sekundarnog" uzorka minimalne mase, pored niza drugih faktora, zavisi od njegove krupnoće.

Efikasnost uzorkovanja u osnovi je funkcija broja zrna ili čestica - tako, što je broj zrna u primarnom uzorku veći, lakše je izdvojiti reprezentativan sekundarni skraćeni uzorak - minimalnu masu uzorka. Broj zrna svakako može biti povećan njihovim usitnjavanjem odnosno smanjivanjem krupnoće.

Nije uvek lako odrediti i osigurati adekvatan broj odgovarajućih zrna da bi se obezbedio dobar uzorak. Razmotrimo, na primer, jedan kubni metar neke rude zlata, koja sadrži 10 g/t plemenitog metala. Ako se, pri tome kod proračuna, uzmu u obzir relativne gustine mineralnih komponenata u toj rudi, grubo se dolazi do zapreminskog odnosa (zlato : jalovina) od jedan prema milion. Razmotrimo ovaj slučaj i drugačije: ako se svo zlato, sadržano u tom kubnom metru rude, smesti samo u jedno zrno, tada bi to zrno bilo veličine skoro jednog kubnog centimetra.

(Ako je $1 \text{ m}^3 = 10^6 \text{ cm}^3$, tada će jedan milioniti deo iznositi $1/10^6 \text{ cm}^3 = 1 \text{ cm}^3$)

Ako se taj veliki stenski blok (sirovina) usitni, razmatrano zrno zlata bi se pre deformisalo, nego usitnilo, zbog svoje osobine kovnosti odnosno elastičnosti. Prema tome, jedini način da se utvrdi tačan sadržaj zlata u takvoj sirovini bio bi da se ceo blok analizira! Međutim, ako se blok sirovine podeli na pola, može se desiti da

jedna polovina neće sadržati zlata uopšte, dotle će druga polovina sadržati 20 g/t Au. Šta više, krupnoće čestica zlata u realnoj rudi su pretežno reda veličine $10 \mu\text{m}$ (a teško da je to 1 cm) i prema tome jasno je da će 1 m^3 sirovine, koji sadrži 10 g/t Au, tako imati 10 komada čestica zlata.

$$1 \text{ m}^3 = 10^{18} \mu\text{m}^3$$

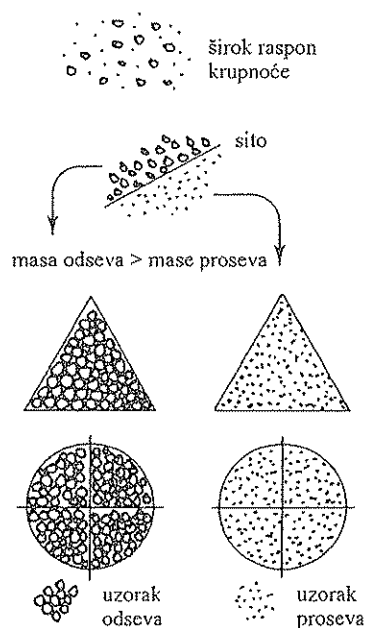
1 zrno zlata prema tome iznosi $10^3 \mu\text{m}^3$ (zapreminski)

1 milioniti deo (zapreminski) = 10^{-6}

$$\text{broj zrna} = 10^{18} \cdot 10^{-6} / 10^3 = 10^9$$

Ukoliko ova zrna zlata, istih dimenzija budu ravnomerno razmeštana po celoj sirovini tada će prosečna zapremina sirovine od 1mm sadržati jedno zrnce zlata, koje ima masu od oko 3 mg, odnosno, $1 \text{ m}^3 = 10^9 \text{ mm}^3$; broj zrna zlata 10^9 ; iz čega sledi da na svako zrno zlata dolazi $10^9 / 10^9 \text{ mm}^3 = 1 \text{ mm}^3$ sirovine.

U stvarnosti, malo je verovatno da će zlato u nekoj takvoj rudi biti ravnomerno raspoređeno i biće potrebna stotinu puta (ili čak hiljadu puta) veća od ove minimalne količine od 3 mg da bi se oformio jedan razuman uzorak. S druge strane, da su zrna zlata krupnoće oko 100 mm tada bi prosečna količina stenske mase koja bi se vezala za svako zrno zlata bila 3 g, a razumna količina uzorka bi bila od 300 g do 3 kg.



Sl.1.25 Uzorkovanje stratifikovanog uzorka. Primarni uzorak se stratifikuje klasiranjem, a svaka od klasa se posebno uzorkuje srazmerno masi date krupnoće.

Ukoliko primarni uzorak sadrži zrna šireg raspona krupnoće (recimo od 1 mm do 10 cm) tada bi verovatno broj krupnih komada bio vrlo mali i uzorkovanje može biti vrlo netačno. U tim slučajevima tačnost uzorkovanja se može znatno poboljšati korišćenjem metode stratifikovanih uzoraka. Primarni uzorak se stratifikuje (klasira prosejavanjem) u nekoliko odgovarajućih klasa krupnoće, a materijal svake od dobijenih klasa posebno i na odgovarajući način uzorkuje (Sl.1.25). Materijali, reprezentativnih uzoraka iz pojedinih klasa krupnoće se tad mogu analizirati posebno ili se mogu spajati u odgovarajućim odnosima i analizirati kao srednji reprezentativni uzorak izdvojen iz primarnog uzorka.

1.4.3 PRINCIPI ODREĐIVANJA MINIMALNE MASE UZORKA

Pri određivanju mase uzoraka neophodno je pridržavati se sledećeg:

□ masa uzorka treba da bude što je moguće manja (minimalna) ali dovoljno velika da bi se u njoj sačuvao kvalitet uzorkovanog materijala; takva masa uzorka se naziva minimalna masa $Q_{\min}$;

□ masa uzorka mora biti dovoljna da bi se predviđena ispitivanja mogla sprovesti (hemijske i mineralne analize, fizička karakterizacija, opiti koncentracije itd.); ovako određena masa uzorka se naziva neophodnom masom Q_n ;

□ način prikupljanja uzoraka mora da obezbedi kako minimalnu tako i neophodnu masu uzorka; masa uzorka izdvojena na ovaj način predstavlja primarni uzorak Q_{prim} .

Uzorci izdvojeni za ispitivanje mogućnosti koncentracije, nekog minerala, nazivaju se tehnološki uzorci. Tehnološki uzorak sa srednjim sastavom sirovine, koji predstavlja uzorkovanu sirovinu, predviđen za duži period prerade, naziva se generalni tehnološki uzorak. Jedan od važnih uslova kod izdvajanja tehnoloških uzoraka jeste očuvanje, neophodne za dalja ispitivanja, odgovarajuće krupnoće materijala. Pri ovome se ima u vidu moguća oksidacija površina preusitnjene sirovine za flotacijsku koncentraciju, potrebna krupnoća materijala za gravitacijsku ili magnetsku koncentraciju itd.

U teoriji uzorkovanja glavna suštinska pitanja koja se tiču tačnosti prikupljanja i obrade uzoraka, su sledeća:

- određivanje broja pojedinačnih uzoraka;
- određivanje minimalne mase uzorka.

Masa uzorka mora biti *dovoljna* (za predviđena ispitivanja) i mora biti *neophodno (minimalno) dozvoljena*. Dovoljna masa uzorka podrazumeva uzorkovanje sa predviđenom rezervom, odnosno, uzorak mora biti bar dva puta veće mase. Neophodna količina ili minimalno dozvoljena masa uzorka mora da obezbedi njegovu reprezentativnost, odnosno kvalitativno i kvantitativno odgovara ukupnoj masi materijala sa koje je uzet.

Iskopana mineralna sirovina, rudarskim postupcima može da bude skladištena u vidu nasipa, gomile, u transportnim sredstvima (vagoneti, željeznički vagoni, barže itd.) ili kao rastresita, sipuća masa u vidu "mlaza" suve rude odnosno mlaza pulpe u postrojenjima za PMS.

Najveće poteškoće se javljaju kod uzorkovanja krupno komadastih rasutih mineralnih sirovina - nasipi, gomile, skladovi, čije količine dostižu i nekoliko hiljada kubika. Ne manje poteškoće javljaju se i kod prikupljanja uzoraka iz utovarene mineralne sirovine u vagonete, željezničke vagone ili barže. Problem ovakvog uzorkovanja je u tome da je praktično nemoguće ravnomerno uzorkovati sve slojeve nasute sirovine.

Ukazane poteškoće smanjuju donekle tačnost uzorkovanja krupnokomadastih nasipa i skladištene sirovine. Iz tih razloga neophodno je organizovati, uvek, dodatna specijalna ispitivanja u cilju razrade postupaka uzorkovanja krupnokomadaste rasute, skladištene, utovarene rudne mase. Međutim, sistematična istraživanja sprovedena su samo kod uzorkovanja uglja, dok su istraživanja kod ruda obojenih metala sprovedena samo delimično.

Pri uzorkovanju rastresitog, sipućeg materijala u vidu mlaza, isto kao i pri uzorkovanju nasipa (skladova, gomila) na tačnost uzimanja uzorka utiču dva faktora: krupnoća komada i stepen neravnomernosti raspodele korisnih komponenta u uzorkovanoj masi. Prvi od njih uzima u obzir masu uzetog uzorka, a drugi vodi računa o broju pojedinačnih uzoraka ili učestalosti "zasecanja mlaza".

Masa uzorka neke sirovine za sitovnu analizu može se odrediti po sledećem obrascu:

za rude

$$Q_r = 0,02 \cdot d^2 + 0,5 \cdot d \text{ (kg)}$$

za ugalj

$$Q_u = 0,04 \cdot d^2 + d \text{ (kg)}$$

gde je d - veličina najkrupnijih komada uzorkovanog materijala u mm.

Za ista određivanja preporučuje se i sledeća jednačina

$$q_r = K_r \cdot d^2 \cdot \delta$$

gde su:

K_r - koeficijent proporcionalnosti:

$K_r = 0,015$ za laboratorijska sita čiji je modul jednak 2;

$K_r = 0,03$ za sita sa skalom čiji je modul drugi koren iz 2;

δ - srednja vrednost gustine ispitivanog materijala;

d - prečnik najkrupnijih komada ili zrna sirovine.

Minimalna količina uzorka, za sitovnu analizu, po vrlo detaljnim izučavanjima Pierre Gy-a (1982), neophodna da zadovolji postavljene uslove tačnosti tokom prosejavanja, zavisi od krupnoće zrna, prisutnih minerala u sirovini, od oblika zrna tih minerala i stepena oslobođenosti minerala i izvodi se iz njegove osnovne jednačine.

Gy-ova (Ži-ova) jednačina za određivanje minimalne mase (kg) uzorka za analiz glasi

$$Q_{\min} = \frac{C \cdot d^3}{V} \text{ (kg)}$$

Konstanta sirovine C , koja je jednaka $C = f \cdot l \cdot g \cdot m$ i zavisi od sadržaja minerala i stepena oslobođenosti.

Gde su:

f - parametar oblika zrna (obično se uzima 0,5 osim za rudu zlata gde je $f = 0,2$);

l - parametar oslobođenosti minerala (koji varira od 0 za kompletno homogeni materijal, do 1,0 za potpuno heterogeni materijal). Parametar zapravo predstavlja odnos prečnika najkrupnijih komada rude d_r prema srednjem prečniku zrna rude d_z ;

g - granulometrijska karakteristika (g varira od 0,25 do 1,0);

m - parametar orudnjenja mineralne sirovine, izračunava se iz

$$m = \frac{1-a}{a} [(1-a) \cdot \rho + a \cdot \tau]$$

gde su:

ρ - srednja gustina korisnog minerala;

τ - srednja gustina minerala jalovine;

a - srednji sadržaj zrna minerala u uzorkovanoj masi;

d - prečnik najkrupnijih komada u uzorku;
 V - koeficijent varijacije sadržaja korisnog minerala.

Minimalna masa uzorka za kvalitativno - mineraloška ispitivanja određuje se po obrascu:

$$Q_{\alpha} = 0,025 \cdot d^3 \cdot \left(\delta \cdot \beta - \delta^2 \cdot \frac{\alpha}{\delta_1} \right) \text{ (kg)}$$

gde su:

d - maksimalni prečnik zrna (mm);
 β - maseni udeo korisnog minerala u najbogatijim komadima krupnoće d (delovi jedinice);
 δ - srednja vrednost gustine uzorkovanog materijala (g/cm^3);
 δ_1 - gustina kontrolisanog minerala (g/cm^3);
 α - srednji maseni udeo korisnog minerala u uzorkovanom materijalu (delovi jedinice).

Za mineraloška ispitivanja se preporučuje izdvajanje uzorka i po sledećem obrascu za minimalnu reprezentativnu masu

$$Q = 10^4 \cdot d_{sr}^3 \cdot \frac{t^2 \cdot (1 - \alpha_v)}{m^2 \cdot \alpha_v}$$

gde su:

δ - srednja vrednost gustine minerala;
 α_v - zapreminski udeo ispitivanog minerala u uzorku;
 m - relativna greška mineraloških određivanja.

Minimalna masa uzorka potrebna za utvrđivanja masenih odnosa elemenata, koje nose zrna minerala Q_{α} , može se odrediti po obrascu:

$$Q_{\alpha} = 0,025 \cdot d^3 \cdot (\beta - \alpha) \text{ (kg)}$$

gde su:

d - dimenzije najkrupnijih zrna, mm (preporuka je da se uzima prečnik otvora najkrupnijeg sita, na kojem ostaje oko 5% materijala);
 β - maseni udeo korisnog minerala u najbogatijim komadima sraslih zrna krupnoće d (delovi jedinice);
 α - srednja vrednost masenog udela korisnog minerala u uzorkovanom materijalu (delovi jedinice).

U obrascima se koeficijent β pojavljuje kao promenljiva veličina za datu sirovinu i zavisi od njene krupnoće. Prema tome, može se računati, da će se sa smanjenjem krupnoće za dva puta deo minerala u sraslim zrnima uvećati na 50%, i stoga sledi

$$\beta_1 = \beta_n (1 + 0,25 \cdot i)$$

gde su:

β_1 i β_n - maseni udeli minerala u sraslim zrnima, odgovarajuće, posle drobljenja i pre drobljenja u svakoj fazi;
 i - stepen usitnjavanja.

Maksimalna vrednost koeficijenta β_1 jednaka je jedinici, što odgovara takvoj krupnoći pri kojoj se među najkrupnijim komadima nalaze slobodna zrna minerala.

Masa uzorka za hemijsku analizu može se odrediti po sledećem obrascu:

$$q = n d_{sr}^3 = 10^4 d_{sr}^3 \cdot \frac{t^2 (1 - \alpha)}{m^2 \alpha} \text{ (kg)}$$

gde su:

d_{sr} - srednji prečnik zrna (mm);
 n i t - određuju se iz jednačina 1 i 2, prethodno datih na strani 18;
 m - relativna greška hemijske analize, %.

Obično je m poznato i zavisi od metode analize, i viđa određivanja elementa i njegovog sadržaja. Međutim pravljenje grešaka se ne može izbeći ni povećanjem mase pojedinačnih uzoraka ni povećanjem broja zasecanja mlaza ako su te greške prouzrokovane znatnom krupnoćom komada.

1.4.4 PRINCIPI ODREĐIVANJA MINIMALNE MASE TEHNOLOŠKIH UZORAKA

Razvoj rudarstva u XIX i XX veku u kapitalističkim zemljama imao je nesumnjivog uticaja i dao značajan doprinos nauci i praksi u oblasti metoda uzorkovanja.

Istraživanja *Bruntona* (1898.), *Rikarda* (1907.), *Ričardsa* (1909.), *Demonda* i *Halferdala* (1923.) kao i mnogih drugih, ostavili su značajne tragove na polju teorijskih i praktičnih problema kod uzorkovanja mineralnih sirovina.

Prva istraživanja vezana su za odnos mase primarnog uzorka i krupnoću mineralnih zrna - materijala koji se uzorkuje i pripisuju se francuskom naučniku *Vezinu* (1865.).

1.4.5 PRINCIP (JEDNAČINA) RIČARD-ČEČOTA

Jedan, često u upotrebi, široko prihvaćen i korišćen princip (odnosno jednačina), zasnovan je na generalizaciji empirijskih podataka, na postavci da minimalna masa uzorka treba da je približno proporcionalna kvadratu prečnika najkrupnijih komada, predložen je od engleskog naučnika *Ričardsa* (1909.). Kasnije je profesor Petrogradskog rudarskog instituta (*G. O. Čečet* 1920.), kroz svoja predavanja o uzorkovanju i ispitivanju ruda, prvi predložio da se pomenuta zavisnost između mase uzorka i njegove krupnoće, iz praktičnih razloga i jednostavne primenljivosti, iskaže obrascem (kasnije nazvanim "Čečetova formula"), a koja se nakon toga mnogo primenjivala. Danas je poznata kao "Ričard Čečetova formula" (*Čečet*, 1932.), i glasi:

$$Q_{\min} = k \cdot d_{\max}^2$$

gde je:

$Q_{\min}$ - neophodna ili minimalna količina uzorka nakon skraćivanja (kg);
 $d_{\max}$ - prečnik najkrupnijih komada (mm);
 k - koeficijent proporcionalnosti, koji zavisi od karakteristika mineralne sirovine:
 - promenljivosti sadržaja korisnih komponenta
 - krupnoće minerala
 - sadržaja komponentata u sirovini
 - razlici u gustinama asocijacije minerala.

Koeficijent k odražava pojavu promenljivosti sadržaja metala u sirovini u odnosu na masu uzorka; na način što veća promenljivost tim veći koeficijent. Sam Čečet je koeficijentu k dodelio vrednosti od 0,16-24,00. Kasnija istraživanja su pokazala da vrednost koeficijenta

ta k može biti i znatno manja. U današnje vreme, u većini slučajeva, k ima vrednost 0,02 za rude sa veoma ravnomernom mineralizacijom, odnosno 0,5 za rude sa krajnje neravnomernom mineralizacijom ili ekstremno koeficijent može biti 1,0.

Jednačina pokazuje, da u svakoj smesi rastresitog materijala postoji neka granična manja količina materijala, koja će pri datoj krupnoći komada i pri datim karakteristikama orudnjenja još uvek očuvati sastav, koji odgovara masi sa koje je uzeta. Ova količina materijala se povećava ukoliko se povećava i krupnoća komada, stepen nehomogenosti mase i korisna komponenta.

Jednačina Ričards-Čečota je našla široku primenu u praksi uzorkovanja mineralnih sirovina. Mnogobrojni eksperimentalni radovi i istraživanja na čitavom nizu različitih tipova ležišta omogućili su da je danas za svaki tip orudnjenja i sirovine određena vrednost koeficijenta k .

Jednačina se uglavnom koristi kod uzorkovanja ruda metalnih mineralnih sirovina, a preporučuje se, takođe za sirovine čiji su najkrupniji komadi (GGK) do 10-12 mm.

Princip Ričard-Čečota po kome se izračunava minimalna reprezentativna količina uzorka, može da se izrazi i u vidu nomograma, za brza očitavanja podataka. (Sl.1.26)

Vrednost koeficijenta k kod određivanja minimalne mase uzorka prikazan je u narednoj tablici 1.8.

Iz ovoga sledi da što je veća - promenljivost sadržaja, krupnoća zrna minerala, što je veća razlika u gustinama prisutnih minerala i što je niži sadržaj komponenata, time je i koeficijent k veći. Jednačina Ričards-Čečota je našla široku primenu u praksi uzorkovanja mineralnih sirovina. Mnogobrojni eksperimentalni radovi i istraživanja na čitavom nizu različitih tipova ležišta omogućili su da je danas za svaki tip orudnjenja i sirovine određena vrednost koeficijenta k .

Klasifikacija različitih vrsta mineralnih sirovina prema sadržaju korisnih komponenata može se ilustrovati tablicom 1.9.

Klasifikacija zrna rudnih minerala i njihovih agregata prema veličini (krupnoći) i načinu njihovog određivanja data je u tablici 1.10.

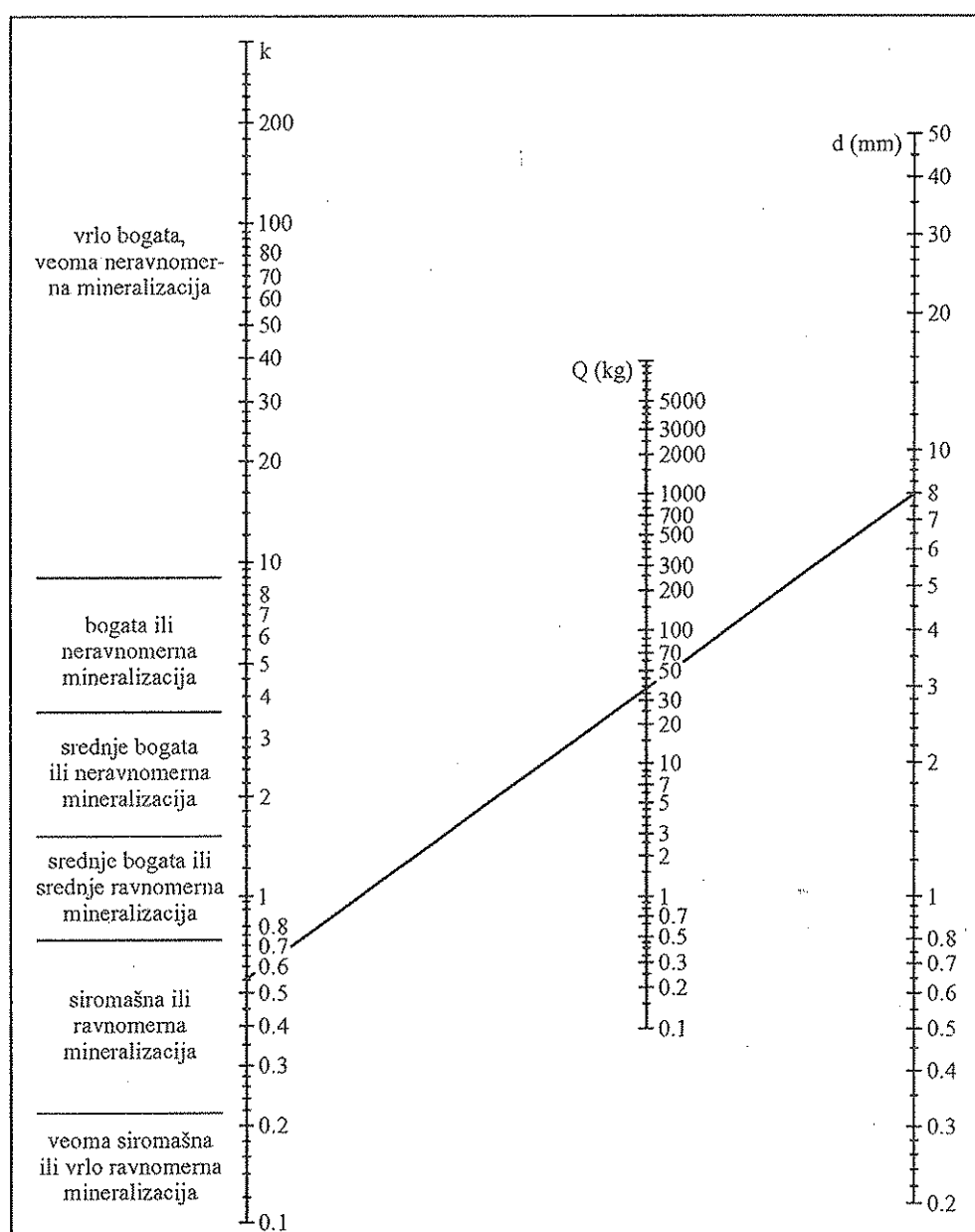
Tablica 1.8 Određivanje koeficijenta k zavisno od karaktera sirovine prema Čečotu

Kategorija	Karakteristike sirovine			Veličina k	
	Sadržaj korisnih komponenata	Ravnomernost orudnjenja	Veličina zrna	Granične vrednosti	Srednje vrednosti
I	Veoma siromašna	Veoma ravnomerna	Mikroskopska do submikroskopska	0,16–0,40	0,25
II	Siromašna	Ravnomerno	Veoma sitna	0,40–1,50	1,00
III	Srednje bogata	Ravnomerno	Sitna	1,50–3,00	1,80
IV	Srednje bogata	Neravnomerna	Srednja	3,00–6,00	4,50
V	Bogata	Neravnomerno	Krupna	6,00–15,0	10,00
VI	Veoma bogata	Veoma neravnomerno	Veoma krupna	15,0–24,0	20,00

Tablica 1.9 Klasifikacija mineralnih sirovina prema sadržaju korisnih komponenata

Vrsta mineralne sirovine	Korisna komponenta	Kvalitativne karakteristike mineralne sirovine		
		Bogata	Prosečna	Siromašna
Gvožđe	Fe	>50 %	50–30 %	30–22 %
Fluorit	CaF	>50 %	50–35 %	35–14 %
Hrom	Cr ₂ O ₃	>45 %	45–30 %	30–24 %
Fosforiti	P ₂ O ₅	>25 %	25–16 %	16–8 %
Antimonit	Sb	desetak procenata	procenti	delovi procenta
Polimetali Bakar, kalaj	Pb, Zn Cu, Sn	procenti	desetine procenta	prve desetine procenta
Molibden	Mo	nekoliko procenata do desetih delova procenta	prve desetine procenta	stoti delovi procenta
Volfram, živa, kobalt, uran, niobium	WO ₃ , Hg, Co, U,			
Retki elementi Berilijum	TR BeO	deseti delovi procenta	stoti delovi procenta	prvi stoti delovi procenta
Zlato	Au	>15 g/t	5–15 g/t	prvi gram po toni
Dijamanti	drag kamen	>1 karat po toni	deseti deo karata po toni	prvi deseti delovi karata po toni

*Vrednost 1 karata je 0,2 g.



Sl.1.26 Nomogram za očitavanje minimalne mase reprezentativnog uzorka.

Tablica 1.10 Klasifikacija sirovine prema veličini zrna rudnih minerala (prema V.Glazkovskom, 1954.)

Klasa	Krupnoća zrna	Veličina zrna	Srednja veličina	Uslov dijagnosticiranja i merenja veličine zrna	Procesi PMS*
I	Vrlo krupna	200–20 mm		Lako slobodnim okom, neposredno merenje	a.
II	Krupna	20–2 mm	11 mm	Jasno slobodnim okom, neposredno merenje ili sitovna analiza	b.
III	Srednje krupna	2–0,2 mm	1,1 mm	Moguće slobodnim okom, merenje pomoću lupe	c.
IV	Sitna	0,2–0,02 mm	0,110 mm	Lupom ili pod mikroskopom	d.
V	Vrlo sitna	0,020–0,002 mm	0,011 mm	Jedino pod mikroskopom	e.
VI	Submikroskopska	0,002–0,0002 mm	0,0011 mm	Velika uvećanja, specijalna merenja	f.
VII	Koloidna	<0,2 μ m	<0,11 μ m	Elektronski mikroskop	g.

* a. Ručno i mehaničko odabiranje, suva magnetska koncentracija, separacija, pranje, prosejavanje.

b. Gravitacijska koncentracija, teške tečnosti i teške sredine, mokra magnetska koncentracija.

c. Klatni stolovi, teške tečnosti, mokra magnetska i elektrostatička koncentracija, flotacija, hidrometalurgija.

d. Flotacija, hidrometalurgija.

e. Ispiranje, specijalne flotacije (klasična, elektro i jonska), hemijsko i biohemijsko luženje.

f,g. Samo hemijsko i biohemijsko (bakterijalno) luženje, specijalni postupci uz prethodnu selektivnu flokulaciju i okrupnjavanje.

Kod izdvajanja uzoraka, kao i pri njihovoj obradi i skraćivanju, veliki značaj ima *promenljivost sirovine u odnosu na sadržaj korisne komponente* koju nose. Ova promenljivost se izražava koeficijentom varijacije, koji se dobija statističkom obradom rezultata hemijske analize. Postupak se izvodi na sledeći način: ukoliko je prikupljeno n uzoraka (ne manje od 20) izvrše se hemijske analize na sadržaj date komponente x_i . Dobijeni podaci se obrade statistički kao što je dato u tablici 1.11.

Srednji sadržaj je $X_{sr} = 169,9/23 = 7,38 \%$, a

srednje kvadratno odstupanje σ iznosi:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum x^2}{n-1}} = \pm \sqrt{\frac{1280,21}{22}} = \pm 7,63$$

gde je: n - broj uzoraka.

Koeficijent varijacije sadržaja K_v iznosi:

$$K_v = \pm \sigma / X_{sr} \cdot 100\% = (7,63 \cdot 100) / 7,38 = \pm 104\%$$

Prema tome, koeficijent k zavisi i od ravnomernosti mineralizacije (varijacije kvaliteta - kakvoće) sirovine i utoliko je veći što je kontrolisani metal cenjeniji i što je neravnomerniji uzorkovani materijal. (Tablica 1.12)

Ravnomernost orudnjenja data preko koeficijenta varijacije sadržaja posmatranog elementa ili minerala, može sasvim uprošćeno da se prikaže na način prikazan u tablici 1.13.

Tako se na osnovu ispitivanja i utvrđivanja ravnomernosti orudnjenja i raspodele korisnog minerala može odabrati vrednost koeficijenta k (zavisno od karaktera orudnjenja) (Tablica 1.14).

Znajući osnovne podatke (masu početnog, primarnog uzorka, maksimalni prečnik početnog-primarnog uzorka, koeficijent K_v) neophodnih za obradu uzorka po obrascu $Q_{min} = k \cdot d^2$, možemo pristupiti njenom skraćivanju. Obrada uzorka, prema tome, obuhvata drobljenje sa mlevenjem, klasiranje, homogenizaciju i skraćivanje. Postupak je sledeći:

♦ Pre svega zadaje se masa konačnog uzorka Q_{kon} ;

♦ Određuje se maksimalni prečnik zrna ili komada sirovine u konačnom uzorku po $Q_{kon} = k \cdot d_{kon}^2$, odnosno $d_{kon} = \sqrt{Q_{kon} / k}$;

♦ Određuje se stepen usitnjenosti početnog uzorka, a to se postiže po obrascu d_{poc}/d_{kon} ;

♦ Pošto stepen usitnjenosti može da bude značajan, usitnjavanje u jednom stadijumu nije preporučljivo niti je moguće, već se odvija u nekoliko faza. Pre svakog usitnjavanja uzorak se prosejava, kao i po završetku kao kontrolno prosejavanje;

♦ Nakon svakog usitnjavanja uzorak može da se podvrgne skraćivanju sledeći odgovarajući obrazac o minimalno dozvoljenoj masi reprezentativnog uzorka.

Tablica 1.11 Statistička obrada podataka sadržaja korisne komponente.

Broj uzorka	Sadržaj komponente, %	Otklon od srednjeg sadržaja Δx_i	Kvadrat otklona Δx_i^2
1	5,2	-2,18	4,75
2	4,5	-3,98	15,84
3	6,8	-0,58	0,34
4	7,4	+0,02	0,00
5	30,08	+23,42	547,56
23	4,9	-2,48	6,15
	$\Sigma x_i = 169,9$		$\Sigma \Delta x_i^2 = 1280,21$

Tablica 1.12 Određivanje koeficijenta k za različite sirovine

Kategorija istovrsnosti, ravnomernosti orudnjenja	Sirovine i koncentrat		
	Obojeni metali*	Gvožđe	Mangan
Veoma ravnomerna	0,06	—	—
Ravnomerna	0,10	0,025	0,1
Srednje ravnomerna	0,15	0,05	0,1
Neravnomerna	0,20	0,10	0,1

*Za obojene metale GOST 14180-80; Za gvožđe GOST 15054-80; Za mangan GOST 16598-80.

Tablica 1.13 Ravnomernost orudnjenja izražena preko koeficijenta varijacije sadržaja

Karakteristike uzorkovane sirovine	Koef. Varijacije, %
Veoma ravnomerna i istovrsna mineralizacija	5-10
Ravnomerna i istovrsna mineralizacija	10-20
Neravnomerna i neistorodna mineralizacija	20-40
Veoma neravnomerna i neistorodna mineralizacija	40-60
Krajnje neravnomerna i neistorodna mineralizacija	60-80

Tablica 1.14 Karakteristike orudnjenja i vrednost koeficijenta k

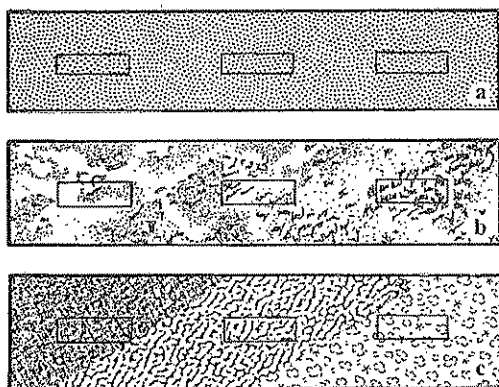
Karakteristike uzorkovane sirovine	Koeficijent, k
Veoma ravnomerna i ravnomerna raspodela komponenata	$k=0,05$
Neravnomerna raspodela komponenata	$k=0,10$
Veoma neravnomerna raspodela komponenata	$k=0,2-0,3$
Krajnje neravnomerna raspodela komponenata	$k=0,4-0,5$
Ležišta zlata sa zrnima preko 0,6 mm	$k=0,8-1,0$

Tablica 1.15 Klasifikacija mineralnih sirovina prema ravnomernosti orudnjenja (po N.Bariševu)

Karakter (ravnomernosti) orudnjenja	Koeficijent varijacije (V) sadržaja elementa	Tip ležišta koja ulaze u datu grupu	Primer ležišta
Vrlo ravnomerno	do 20	Sedimentna ležišta: ugalj, škriljci, kamena so, ležišta gvožđa i mangana, cementne sirovine, građevinski materijali, fosforiti	Kolubara, Popovac Kostolac
Delom ravnomerno	20-40	Sedimentna ležišta: soli, gline, mangana, pojedina boksita i gvožđa	Garaši
Neravnomerno	40-100	Većina hidrotermalnih i skarnovskih: bakrenosna i polimetalična, nikla, volframa, molibdena i pojedina zlatonosna	Majdanpek, Veliki Krivelj, Trepča
Vrlo neravnomerno	100-150	Kao predhodna grupa:	Blagojev kamen Neresnica
Krajnje neravnomerno	>150	Kao predhodna grupa:	Blagojev kamen

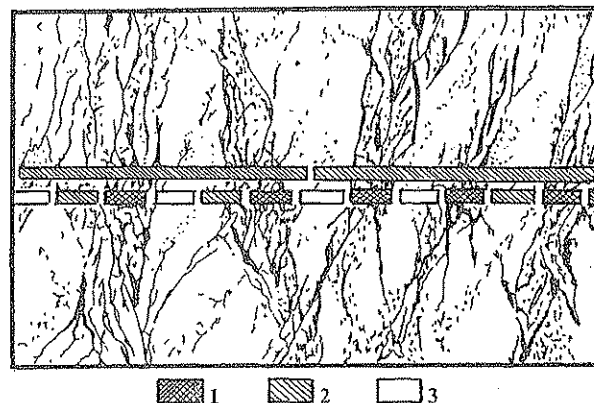
Primer klasifikacija mineralnih sirovina prema karakteristikama (ravnomernosti) orudnjenja dat je u tablici 1.15.

Ilustracija relativnih karakteristika neravnomernosti mineralizacije (dimenzije elemenata sklopa i strukturno - teksturne karakteristike) i njihov odnos prema linearnim razmerama elemenata uzorkovanja, data je na slici 1.27.



Sl.1.27 Ilustracija relativnih karakteristika neravnomernosti mineralizacije zavisno od dimenzija elemenata sklopa (po A.B.Každan); a - Uslovno sklop sa ravnomernom mineralizacijom; b - Sklop sa statističkom neravnomernošću mineralizacije; c - Sklop sa geološkom neravnomernošću mineralizacije.

Na predstavu o strukturi mineralne sirovine ukazuju pojmovi o dimenzijama uzoraka. Tako će, na primer, sklop štokverke mineralizacije izgledati kao ravnomeran, ako su razmere uzorkovanih površina znatno veće od dimenzija prožilaka i delova jalovog stenskog materijala, odnosno neravnomeran, ukoliko se izdvajaju uzorci manjih dimenzija. Ilustracija odnosa razmera uzoraka u štokverkoj mineralizaciji dati su na slici 1.28.



Sl.1.28 Ilustracija pojma kompaktnosti građe štokverke mineralizacije i dimenzija uzoraka; 1 - Uzorci sa visokim sadržajem metala; 2 - Uzorci sa srednjim sadržajem metala; 3 - Uzorci praktično jalovog materijala.

1.4.6 PRINCIP (JEDNAČINA) DEMOND-HALFERDALA

U poslednje vreme veći broj istraživača sve češće koristi jednačinu koju su predložili američki istraživači *Demond* i *Halferdal* (1923.), koja je opštijeg karaktera a koja je i proizašla razradom jednačine Ričards-Čečota i proverena eksperimentalnim radovima. Jednačina za minimalnu količinu uzorka glasi:

$$Q_{\min} = k \cdot d_{\max}^a$$

gde je

$Q_{\min}$ - minimalna masa uzorka, kg;

$d_{\max}$ - prečnici najkrupnijih komada u uzorku, mm;

k - koeficijent proporcionalnosti, koji zavisi od svojstava mineralne sirovine (gustina, forme zrna, sadržaja, stepena ravnomernosti orudnjenja i krupnoće orudnjenja) a takođe i od dozvoljenog stepena pogrešnosti;

α - vrednost eksponenta koji se menja zavisno od karaktera sirovine i kreće se u rasponu 1,5-2,7. Empirijski koeficijenti k i α prikazani su u tablici 1.16.

Tablica 1.16 Vrednosti koeficijenta k i eksponenta α

Karakteristika sirovine	Koeficijent k	Eksponent α	
		Uzorci malih masa	Industrijski uzorci
Veoma ravnomerna mineralizacija	0,05	2,00	—
Ravnomerna mineralizacija	0,10	2,00	—
Neravnomerna mineralizacija	0,20	2,00	1,80

Ova jednačina se preporučuje kod uzorkovanja ugljeva, odnosno za krupnokomadaste sirovine gde su najkrupniji komadi (GGK) veći od 12 mm.

Izvesne poteškoće u praktičnoj primeni ove jednačine moguće je lako otkloniti, tako što će se ona logaritmovati, nakon čega ona predstavlja pravu liniju. Grafičkim prikazivanjem ove jednačine na dijagramu sa logaritamskom podelom (Sl.1.29) moguće je lako očitati minimalno potrebnu masu uzorka pri bilo kojoj krupnoći sirovine.

Sem eksperimentalnim određivanjem, do vrednosti k i α se može doći i očitavanjem njihovih vrednosti iz tablica koje daju pojedini autori. Tako *Požarickij* predlaže da se kod obrade uzoraka obojenih i retkih metala koriste uglavnom tri jednačine:

$$Q_{\min} = 0,06 \cdot d^{1,8} \quad (\text{kg})$$

$$Q_{\min} = 0,1 \cdot d^2 \quad (\text{kg})$$

$$Q_{\min} = 0,18 \cdot d^{2,25} \quad (\text{kg})$$

Jednačina $Q_{\min} = 0,06 \cdot d^{1,8}$ koristila bi se za obradu uzoraka koje čine rude sa ravnomernom mineralizacijom korisnom komponentom i sitnim sraslacima, kao i sirovina kod kojih se korisni minerali u procesu drobljenja lako preusitnjavaju.

Jednačina $Q_{\min} = 0,1 \cdot d^2$ primenjivala bi se kod sirovine sa neravnomernom mineralizacijom, kao i za rude retkih metala kod kojih se korisni mineral lako melje.

Jednačina $Q_{\min} = 0,18 \cdot d^{2,25}$ koristila bi se kod obrade uzoraka sirovine sa krajnje neravnomernom raspodelom korisne komponente.

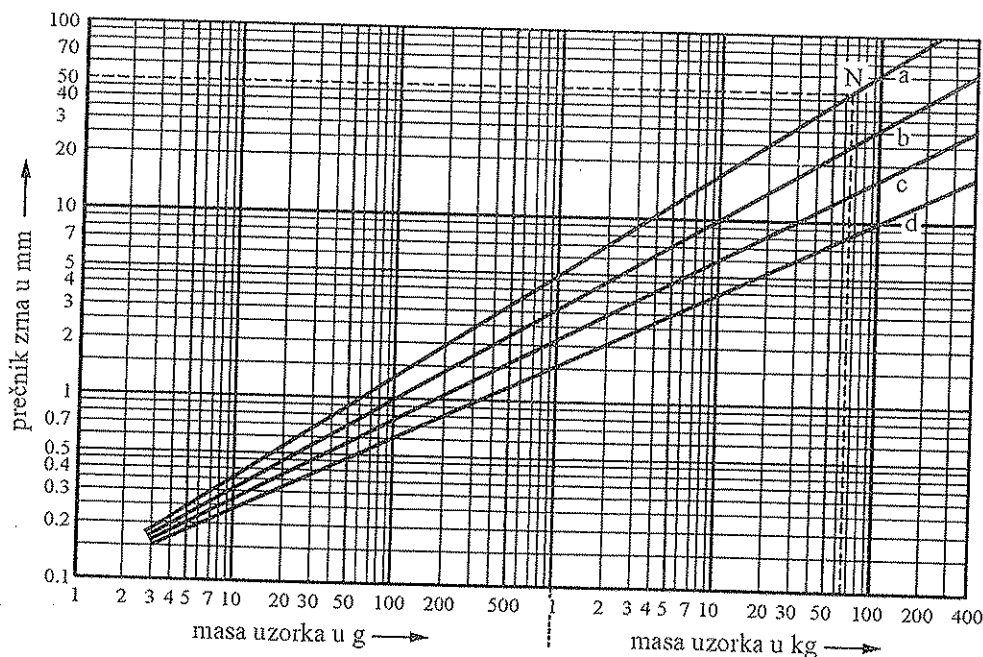
U tablici 1.17 prikazane su minimalno potrebne mase uzoraka pri različitoj krupnoći zrna.

Za napred prikazane jednačine, *K.L.Požarickij* je izradio i odgovarajući dijagram (Sl.1.29).

Tablica 1.17 Minimalne mase uzoraka pri različitoj krupnoći sirovine (po *K.L.Požarickom*)

Prečnik	Tip mineralizacije, impregnacija rudnim mineralima		
	Veoma ravnomerna mineralizacija	Neravnomerna mineralizacija	Vrlo neravnomerna mineralizacija
20	15	40	160
10	4	10	35
8	2,5	6	20
5	1,5	2,5	7
3	0,45	0,9	2,5
2	0,2	0,4	0,9
1	0,06	0,1	0,18
0,5	0,018	0,025	0,04
0,1	0,001	0,001	0,001

N.V.Barišev, preporučuje da se za određivanje minimalne količine uzorka kod izučavanja sirovina pojedinih tipova ležišta koriste podaci za u tu svrhu oformljene tablice 1.18.



Sl.1.29 Bilogaritamski dijagram za određivanje minimalne potrebne količine uzorka po *K. Požarickom*.

Tablica 1.18 Određivanje minimalne mase uzorka zavisno od karakteristika sirovine (po N. V. Bariševu).

Kategorija uzorka	Vrednost koeficijenta k	Tip sirovine	Potrebna masa (kg) pri različitoj krupnoći najkrupnijih komada (mm)					
			50 mm	20 mm	10 mm	5 mm	2,5 mm	1,0 mm
I	0,02	Veoma ravnomerno orudnjenje: sumpor, pirit	50	8	2	0,5	0,12	0,02
II	0,05	Ravnomerno orudnjenje: pirit-hal-kopiritski tip, nikl, polimineralni	125	20	5	1,25	0,32	0,05
III	0,20	Neravnomerno orudnjenje: većina polimineralnih i ležišta zlata	500	80	20	5	1,25	0,20

Tablica 1.19 Vrednosti koeficijenata k i α po podacima K. L. Požarickog, N. V. Bariševa i P. L. Kalistova

Mineralizacija	Tip rude	k	α
Ravnomerna	Porfirske rude Cu, pirita, polimetalične rude, arsena, retkih elemenata	0,06	1,8
Neravnomerna, sa sklonošću preusitnjavanja korisnih minerala	Rude obojenih metala (teški)	0,06	1,8
Sadržaj korisnog minerala odgovara sadržaju stenske mase	Boksiti, rude gvožđa	0,06	1,8
Neravnomerna	Ruda molibdena, žive, bakra, srebra, olova-cinka	0,1	2,0
Neravnomerna, sa sklonošću preusitnjavanja korisnih minerala	Rude retkih metala	0,1	2,0
Krupna neravnomerna	Rude Mo, šelita, W, Hg, Sn	0,18	2,25
Sitna ravnomerna	Rude zlata	0,2	2,0
Srednja neravnomerna	Rude zlata	0,4	2,0
Krupna neravnomerna	Rude zlata	0,8–1,0	2,0

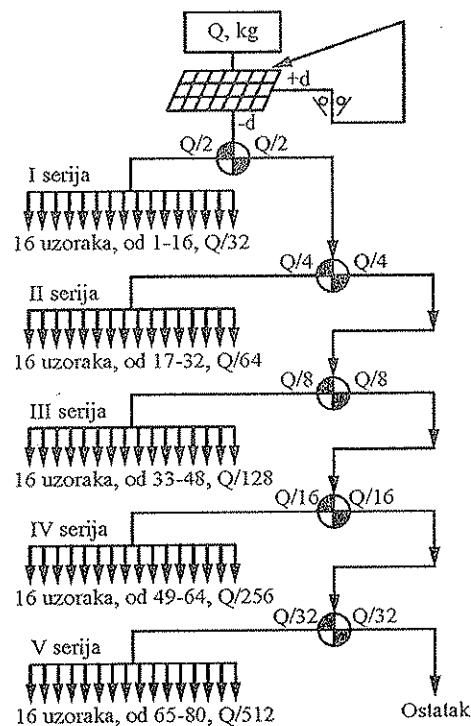
Grupa autora (Požaricki, Barišev, Kalistov) minimalnu masu uzorka određuje po empirijskom obrascu, praktično razrađujući Demond-Halferdal-ovu jednačinu, a parametre k i α određuju eksperimentalno, kako je prikazano u tablici 1.19.

K. L. Požaricki, N. V. Barišev i P. L. Kalistov su pokazali da se uzorci mogu prikupiti pri znatno nižim vrednostima koeficijenta k . Ovaj istraživački tim je kroz eksperimentalni rad ponudio određene vrednosti za k i α uzimajući pri tome u obzir ravnomernost orudnjenja i podelu sirovina na osnovne tipove ruda.

Teoretsko obrazloženje ovih jednačina, za minimalnu količinu uzorka, izводи se na osnovu metoda odabira u matematičkoj statistici.

Imajući u vidu gore izneto P. L. Kalistov je dao postupak rada pri eksperimentalnom određivanju vrednosti k i α .

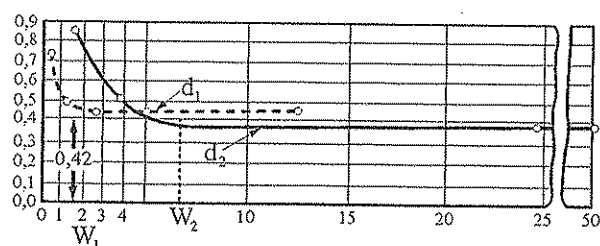
❖ **Primer:** Za ova ispitivanja je neophodno uzeti dva uzorka, iz polaznog materijala sirovine koja se ispituje, od po 2t svaki. Prvi uzorak, krupnokomadaste rude, usitniti do krupnoće d_1 (do 10 mm), a drugi uzorak do krupnoće d_2 (do 5 mm), i nakon brižljive homogenizacije uzorak podeliti na dva jednaka dela kvartiranjem. Od tako dobijene polovine uzorka pažljivo izdvojiti nekoliko (na primer 16 porcija u toj seriji) uzoraka ali tako da budu istih masa. Svaki od izdvojenih uzoraka se samelje, u odgovarajućem mlinu do krupnoće ispod 0,1 mm i dobro homogenizira. Ovi samleveni uzorci se pažljivo, nakon homogenizacije, dalje uzorkuju za hemijsku analizu (primeniti metod šahovskih polja). Drugi deo uzorka nakon temeljne homogenizacije podeliti na dva dela kvartiranjem nakon čega na obe polovine ovog uzorka primeniti iste operacije kao i kod prethodnog uzorka, do dobijanja pojedinačnih uzoraka od polazne mase. Obradu uzoraka sa homogenizacijom, deljenjem i uzorkovanjem vršiti dotle dok u poslednjoj seriji masa pojedinačne porcije ne dostigne vrednosti od 200–250g.

Slika 1.30 Šema skraćivanja uzorka i utvrđivanje koeficijenta k

Uzevši drugu količinu polaznog uzorka, istog materijala, izdobljenog do krupnoće d_2 (5 mm) izdvojimo ga po istom postupku i homogeniziranjem privedemo do analitičkih uzoraka odnosno podataka hemijske analize. Otklon sadržaja korisne komponente u pojedinim uzorcima od njegovog sadržaja u datoj seriji odražavaju grešku, nastalu u postupcima skraćivanja uzorka i hemijske analize. Srednje vrednosti otklona, u

datoj seriji smatraju se kao srednja greška, karakteristična za uzorak date mase i pri datom stepenu usitnjenosti.

Šema obrade uzorka kod određivanja k i α data je na Sl. 1.30 i 1.31 a primer obrade rezultata analize u tablici 1.20.



Sl.1.31 Dijagram određivanja koeficijenta k

Na osnovu ovih podataka konstruiše se grafik koji pokazuje zavisnost veličine srednje greške od količine, mase uzorka. Zamenom dobijenih vrednosti za minimalno potrebne mase uzoraka q_1 i q_2 , u dati obrazac određuju se parametri k i α na sledeći način: postavivši grafik zavisnosti srednje greške od mase uzorka Q , određuju se mase uzoraka Q_1 i Q_2 , odgovarajuće, na primer srednjim otklonom, koji iznosi 0,42% za uzorke samlevene do krupnoće d_1 i d_2 .

Dalje, za samo određivanje koeficijenata k i α mogu se postaviti jednačine

$$Q_1 = k d_1 \quad i$$

$$Q_2 = k d_2$$

u koje se zamenjuju utvrđene vrednosti Q_1 i Q_2 . Logaritmovanjem ovih izraza, dobijamo:

$$\lg Q_1 = \lg k + \alpha \lg d_1$$

$$\lg Q_2 = \lg k + \alpha \lg d_2$$

oduzimanjem drugog izraza od prvog, dobijamo:

Tablica 1.20 Statistička obrada rezultata analize

Masa polaznog materijala	Broj uzorka	Sadržaj korisne komponente			Srednji sadržaj korisne komponente			Razlika od srednje vrednosti iz serije, %
		Prva serija odvaga	Druga serija odvaga	Treća serija odvaga	Prema tri analize	Prema kontrolnoj analizi	Prihvaćena srednja vrednost	
q/2	1	17,2	17,8	17,5	17,5	17,3	17,4	0,00
	2	16,9	17,6	16,5	17,0	16,7	16,9	-0,5
	3	18,0	17,5	17,0	17,5	17,5	17,5	+0,1
	4	17,5	18,5	18,0	18,0	17,8	17,9	+0,5
	5	17,3	17,5	17,1	17,3	17,4	17,3	-0,1
	6	17,1	17,5	17,9	17,5	17,2	17,4	0,0
	7	16,4	17,2	17,4	17,0	17,1	17,1	-0,3
	8	17,0	17,5	17,1	17,2	17,2	17,2	-0,2
	9	17,5	17,2	17,2	17,3	17,4	17,3	-0,1
	10	17,8	16,6	17,2	17,2	16,8	17,0	-0,1
	11	18,1	17,9	18,0	18,0	17,6	17,8	+0,4
	12	17,9	18,1	18,3	18,1	18,0	18,0	+0,6
	13	17,5	17,2	17,8	17,5	17,8	17,7	+0,3
	14	17,4	17,2	17,6	17,4	17,0	17,2	-0,2
	15	17,1	17,3	17,5	17,3	17,3	17,3	-0,1
	16	17,0	17,1	17,2	17,1	17,0	17,0	-0,4
Suma							2780	4,2
Srednji sadržaj za prvu seriju							17,4	0,27
q/4	Srednji sadržaj za drugu seriju						17,0	0,40
q/8	Srednji sadržaj za treću seriju itd.						17,3	0,55

$$\lg Q_1 - \lg Q_2 = \alpha (\lg d_1 - \lg d_2)$$

a iz toga izrazimo

$$\alpha = \frac{\lg Q_1 - \lg Q_2}{\lg d_1 - \lg d_2} = \frac{\lg \frac{Q_1}{Q_2}}{\lg \frac{d_1}{d_2}}$$

zamenom dobijene vrednosti za α u prvi izraz, dobijamo vrednost za k .

$$\lg k = \lg Q_1 - \alpha \lg d_1$$

Metodika određivanja k i α se zasniva na pretpostavci da se sa povećanjem ukupne mase uzorka (pri datim krupnoćama komada sirovine) greška uzorkovanja postepeno smanjuje do neke određene vrednosti, koja zavisi opet od tačnosti hemijske analize i metoda obrade uzorka. Na taj način sumarna ili ukupna greška obrade uzorka, ne računajući greške kod uzimanja uzoraka, se sastoji: od greške skraćivanja uzorka, u smislu nesavršenosti homogenizacije u toku obrade i greške uslovljene nedovoljnim brojem komada u uzorku, tj. malom, nedovoljnom masom uzorka; kao i greške hemijske analize. Kako greška, koja se javlja usled nedovoljne mase uzorka ulazi u sumarnu grešku i pošto je greška usled netačnosti operacije skraćivanja praktično nesavladiva, prvu grešku nije moguće posebno odrediti. Ipak, izvedeći operaciju skraćivanja uzorka sa maksimalnom brižljivošću prilikom homogenizacije, greška nastala pri toj operaciji se može svesti na neku stalnu vrednost. U tom slučaju promena sumarne, ukupne greške od serije do serije će biti uslovljena neusklađenošću između mase uzorka i dimenzija komada sirovine u smesi.

1.4.7 PRINCIP (JEDNAČINA) VEZINA

Prva istraživanja vezana za odnos mase primarnog uzorka i krupnoću mineralnih zrna - materijala koji se uzorkuje, pripisuju se francuskom naučniku *Vezinu* (1865.). Princip i jednačina Vezina se zasniva na postavci da je broj zrna ili komada u primarnom i skraćenom - sekundarnom (daleko manjem) uzorku, isti. Tako imamo uzorak za hemijsku analizu:

$$\frac{q}{Q} = \frac{d^3 \cdot \delta \cdot n}{D^3 \cdot \delta \cdot n} = \frac{d^3}{D^3}$$

gde su:

- q - masa (odvaga) uzorka za hemijsku analizu (sekundarni uzorak);
- Q - početna masa uzorka (primarni uzorak);
- d - krupnoća mineralnih zrna u uzorku za hemijsku analizu;
- D - krupnoća mineralnih zrna u polaznom (primarnom uzorku) uzorku;
- δ - gustina sirovine;
- n - broj mineralnih zrna.

Ako se uzme da su sva zrna istih dimenzija u obliku kocke ili lopte, to će masa uzorka biti proporcionalna kubu broja zrna-čestica koje se nalaze u uzorku.

Minimalna masa uzorka se izračunava po jednačini koja glasi:

$$\frac{Q}{q} = \frac{D^3}{d^3}$$

gde su:

- Q - minimalna masa primarnog uzorka (kg);
- D - srednji prečnik najkrupnijih komada u primarnom uzorku, mm;
- q - masa uzorka posle skraćivanja (sekundarnog uzorka), kg;
- d - srednji prečnik najkrupnijih komada u skraćenom uzorku, mm.

Ako se u jednačinu uvede koeficijent proporcionalnosti određen datim brojem čestica $k=Q/D^3$, jednačina Vezina imaće oblik:

$$q = k \cdot d^3$$

gde su:

- q - masa uzorka (minimalna masa sekundarnog uzorka);
- k - koeficijent određen datim brojem zrna ili čestica u uzorku;
- d - krupnoća zrna ili čestica.

Jednačina nije široko prihvaćena u praksi, jer bi kod sirovina sa krupnijim komadima ($d = 10 - 20$ mm) bilo potrebno izdvajati uzorke znatnih masa ($Q = 2,5-3,0$ t) i vršiti isuviše fina mlevenja. Sem toga najkrupnija zrna na osnovu kojih je određena masa uzorka predstavljeni su samo manjim delom u odnosu na ukupan broj zrna u uzorku. Otuda će masa uzorka u stvari biti proporcionalna broju zrna-čestica sa srednjim a ne maksimalnim prečnikom. Kako je, međutim, određivanje srednjeg prečnika komplikovano to se u praksi najčešće radi sa maksimalnim prečnikom zrna.

1.4.8 PRINCIP (JEDNAČINA) BRUNTONA

Princip i jednačina *Bruntona* određuje minimalnu količinu uzorka ne samo u zavisnosti od krupnoće komada sirovine, stepena ravnomernosti i sadržaja mineralizacije, već i od drugih faktora. Jednačina glasi:

$$Q = \frac{D^3 \cdot \delta \cdot f \cdot n}{10^4 \cdot p} \cdot \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1 \right)$$

gde su:

- Q - minimalna masa primarnog uzorka (kg);
- D - srednji prečnik najkrupnijih komada ili zrna u uzorku, mm (do kojih je sirovina izdrobljena u uzorku);
- δ - gustina korisnog minerala;
- β - sadržaj metala u korisnom mineralu;
- α - srednji sadržaj metala u uzorku;
- n - broj (količina) zrna ili komada koji se nalazi u skraćenom uzorku, suficitu ili deficitu u odnosu na primarni uzorak;
- f - odnos stvarne mase najkrupnijih komada korisnog minerala, prošlog kroz sito čiji su otvori D_{mm} , prema masi komada ili zrna korisnog minerala većih od dimenzija otvora sita D_{mm} ;
- p - dozvoljena greška uzorkovanja, jednaka relativnoj grešci hemijske analize.

Jednačina je veoma složena i da bi se utvrdila minimalna masa koju reprezentativan uzorak mora da poseduje potrebno je veoma opsežno ispitivanje.

Požarickij je kasnije u Bruntonovu jednačinu uneo izvesne popravke i dopune. Prema njegovom mišljenju, Brunton je kod izvođenja svoje jednačine nepravilno postupio kada je gustinu najkrupnijih zrna pri srednjem sadržaju metala izjednačio sa gustinom najkrupnijeg zrna bogatijeg minerala. Gustinu najkrupnijih zrna, pri srednjem sadržaju metala α , *Požarickij* je označio sa γ i Bruntonovoj jednačini dao sledeći izgled:

$$Q = \frac{D^3 \cdot f \cdot n \cdot (\gamma \cdot \beta \pm \gamma_1 \cdot \alpha)}{10^4 \cdot c \cdot p}$$

gde je:

- c - srednji sadržaj korisne komponente;
- γ - gustina sirovine;
- γ_1 - gustina korisnog minerala;

1.4.9 PRINCIP (JEDNAČINA) ČERNENKA

Černenko je predložio jednačinu za određivanje minimalne mase reprezentativnog uzorka po sledećoj jednačini

$$Q = k \cdot d$$

gde su:

- d - srednji prečnik najkrupnijih komada u uzorku, mm;
- k - koeficijent proporcionalnosti koji ima vrednost od 1-1,5 za ravnomernu i neravnomernu mineralizaciju.

Jednačina je primenljiva kod izdvajanja uzoraka uglja za raslojavanja u teškim tečnostima.

1.4.10 PRINCIP (JEDNAČINA) ŽIA

Minimalna količina uzorka, za analizu, po vrlo detaljnim izučavanjima Pierre Gy-a (1982.), neophodna da zadovolji postavljene uslove tačnosti tokom analize, zavisi: od krupnoće zrna; od vrste prisutnih minerala u sirovini; od oblika zrna tih minerala; i od stepena oslobođenosti minerala, a može da se izvede iz osnovne jednačine:

$$V^2 = \frac{f \cdot r \cdot d^3}{P} \cdot \left[\frac{1}{m} - \frac{1}{M} \right]$$

odnosno za $m \leq M$

$$V^2 = \frac{f \cdot r \cdot d^3}{P}$$

gde su:

- V - koeficijent varijacije;
- f - faktor oblika zrna (obično 0,5);
- P - gustina zrna;
- d - srednji prečnik zrna u najkrupnijoj klasi krupnoće;
- r - maseni udeo najkrupnije klase krupnoće;
- M - masa polaznog, primarnog uzorka;
- m - masa izdvojenog uzorka za dalju analizu.

Autor razrađuje ovakav pristup i postavlja sledeći izraz

$$\frac{L \cdot M}{L - M} = \frac{C \cdot d^3}{V}$$

odakle sledi da je minimalni uzorak sirovine za dalja ispitivanja

$$M = \frac{C \cdot d^3}{V}$$

ili u obliku koji nam je bliži za određivanje minimalne mase (kg) uzorka

$$Q_{\min} = \frac{C \cdot d^3}{V}$$

jer je masa skraćenog uzorka za analizu najčešće mnogo manja od mase primarnog uzorka. Tako imamo da je:

- M - minimalno dovoljna masa ($Q_{\min}$) uzorka za analizu (g);
- L - ukupna masa primarnog uzorka sa koje je uzorkovan (g);
- C - konstanta sirovine (g/cm^3);
- d - dimenzije najkrupnijih komada uzorkovane sirovine, (cm);
- σ^2 - disperzija, odnosno σ - mera statističke greške koja je prihvaćena u analitičkim rezultatima (obično sadržaj ili elementarni sastav uzorka);
- V - koeficijent varijacije sadržaja korisnog minerala.

Konstanta sirovine C je jednaka $C = f \cdot I \cdot g \cdot m$ i zavisi od:

- f - parametar oblika zrna (obično se uzima 0,5 osim za rudu zlata gde je $f = 0,2$);
- I - parametar oslobođenosti minerala (koji varira od 0 za kompletno homogeni materijal, do 1,0 za potpuno heterogeni materijal). Parametar zapravo predstavlja odnos prečnika najkrupnijih komada rude d prema prečniku zrna rude d_0 . Pri brzom određivanju parametra I može nam poslužiti sledeća tablica:

Tablica 1.21 Vizuelno određivanje parametra oslobođenosti I

d/d ₀	1	1-4	4-10	10-40	40-100	100-400	>400
I	1,0	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,02

g - granulometrijska karakteristika (g varira od 0,25 do 1,0); Za sirovine koje nisu ograničene klasama krupnoće $g=0,25$ a za rudu uske klase krupnoće $g=0,5$.

m - parametar orudnjenja mineralne sirovine se izračunava iz

$$m = \frac{1-a}{a} \cdot [(1-a) \cdot \rho + a \cdot \tau]$$

gde su:

- ρ - srednja gustina korisnog minerala;
- τ - srednja gustina minerala jalovine. Ova dva parametra uslovno možemo da uzmemo kao nepromenljive $\rho = 5$ a za $\tau = 2,6$
- a - srednji sadržaj rudnog minerala u zrnima uzorkovane sirovine, deseti delovi jedinice.

Vrednost parametra a utvrđuje se na osnovu podataka analiza većeg broja uzoraka.

Iz čega zaključujemo da Gy-ova jednačina favorizuje i daje dobre rezultate kod uzorkovanja onih materijala koji su predhodno vrlo fino samleveni, pošto u jednačini dominira krupnoća zrna d. Međutim, za različita ispitivanja sirovine (posebno mineraloška) nije racionalno (ponekad čak i neprihvatljivo) usitnjavati sirovinu da bi bila uzorkovana.

G.I.Prejgerzon, M.N.Albov, V.M.Krejter određivanje minimalne mase reprezentativnog uzorka preporučuju po jednačini

$$Q = q^n$$

gde su:

- q - srednja vrednost masa pojedinačnih uzoraka (porcija, zasecanja), koje će objedinjavanjem činiti opšti uzorak (kg);
- n - broj pojedinačnih uzoraka, gde je $n = (t V/p_0)^2$
- V - koeficijent varijacije sadržaja metala u pojedinačnim uzorcima, %;
- t - koeficijent verovatnoće;
- p_0 - dozvoljena (zadata) greška uzorkovanja, u % od sadržaja metala u uzorkovanoj sirovini.

I. P. Alimarin daje obrazac po kome može da se izračuna minimalna masa uzorka, pri određenoj finoći mlevenja i pri izvesnim drugim faktorima koji mogu da imaju uticaja na veličinu uzorka, koja glasi

$$Q \geq \frac{(100 - P) \cdot d^3 \cdot \delta}{n^2 \cdot P \cdot 10^5}$$

gde su:

- P - sadržaj korisne komponente, %;
- d - dimenzije najkrupnijih komada-zrna (mm);
- δ - srednja gustina zrna (g/cm^3);
- n - dozvoljena relativna greška određivanja.

N. Barišev pri određivanju početne mase uzorka, izdvojenog sa skladištane sirovine preporučuje da se koristi jednačina:

$$Q = q \cdot n = q \cdot \frac{t^2 \cdot V_m^2}{p^2}$$

gde su:

q - srednja masa pojedinačnih (parcijalnih) uzoraka (kg);

n - broj pojedinačnih uzoraka (vidi obrasce 1 i 2 na strani 16).

t - koeficijent verovatnoće koji odgovara reprezentativnosti uzorka Q (u većini slučajeva vrednost iznosi $t < 1,7-2,0$);

V_m - koeficijent varijacije sadržaja korisne komponente u pojedinačnim uzorcima, njegova veličina zavisi od više faktora;

p - data greška uzorkovanja (skraćivanja).

1.5 POSTUPAK OBRADE UZORKA

Svako uzorkovanje se mora sprovoditi u skladu sa zakonima teorije uzorkovanja, odnosno zakonima teorije verovatnoće. Osnovni faktori jesu određivanje mase uzorka i broja pojedinačnih (parcijalnih, trenutnih) uzoraka. Dozvoljene greške, koje se pri tome čine, ne bi smele preći vrednosti pri kojima bi izdvojeni uzorak izgubio svoju reprezentativnost. Greške uzorkovanja se svode na mogućnost otklona (odstupanja vrednosti) sadržaja elementa koji se određuje u uzorku, od njegovog stvarnog sadržaja u polaznom materijalu. Pri određivanju mase parcijalnog uzorka neophodno je voditi računa o stepenu neravnomernosti mineralizacije - razmeštaju ispitivanog minerala u rudnoj masi, razmerama najkrupnijih komada ili zrna i, na kraju, o tehničkim uslovima uzorkovanja.

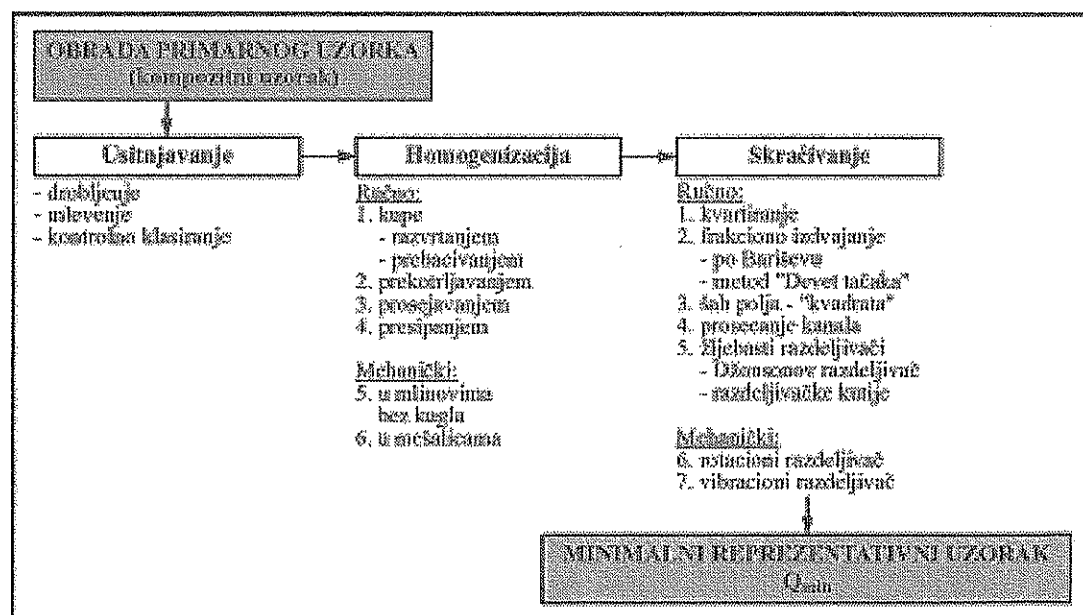
1.5.1 UVOD U OBRADU UZORKA

Primarni uzorci se, zavisno od metoda izdvajanja, najčešće sastoje od znatno većih masa materijala, uz to tehnički neadekvatnih (u pogledu krupnoće, vlažnosti, količine, reprezentativnosti) za planirana ispitivanja. Te količine su najčešće daleko veće nego što je potrebno za određena ispitivanja - za hemijsku analizu, mineraloške analize, granulometrijski sastav, određivanje vlažnosti, opite flotiranja i dr. Pri tome treba imati u vidu potrebne količine materijala kako za analize, konačnih ili laboratorijskih uzoraka, tako i za njihove duplikate odnosno rezerve. Zadatak obrade uzoraka je da se početni, primarni uzorak dovede na minimalnu, ali još uvek repre-

zentativnu masu tehnički pogodnu za predviđena ispitivanja. Prema tome, minimalna masa uzorka treba da sadrži sve one komponente i sa istim odnosima koje je imao i primarni uzorak, ili da odstupanja među njima leže u dozvoljenim granicama. Proces obrade uzoraka biće utoliko složeniji što je materijal početnog uzorka nehomogeniji.

1.5.2 METODE OBRADE UZORAKA I IZBOR ŠEMA SKRAĆIVANJA

Obrada uzoraka od krupnokomadastog ili sitnozrnog materijala sastoji se iz sledećih operacija: drobljenja, mlevenja, homogenizacije i skraćivanja (Sl.1.32). Postupak sukcesivnih operacije obrade uzorka obično se daje u vidu šeme. Primarni uzorak izdvojen na ležištu mineralne sirovine ili u pogonu za PMS, iz industrijskog procesa mora, prema svojim karakteristikama, biti dovoljan (za obim predviđenih ispitivanja) i mora da ima minimalno neophodnu odnosno dozvoljenu masu. Primarni uzorak bi trebalo da bude bar dvostruko veći od minimalno dozvoljene količine. Srednji ili primarni uzorak veće količine od minimalno dozvoljene koji treba podvrgnuti obradi odnosno skraćivanju treba da bude osušen do vazdušno-suvog stanja, izdrobljen, nakon čega mora biti homogeniziran i pristupa se skraćivanju. Obrada primarnog uzorka iz industrijskog procesa kao i ciljevi samog uzorkovanja dati su na slici 1.33.



Sl.1.32 Operacije obrade primarnog (kompozitnog) uzorka.

OBRADA PRIMARNOG ILI KOMPOZITNOG UZORKA iz industrijskog procesa

Kontrola rada pogona	Ispitivanje rada pojedinih faza industrijskog procesa	Snimanje rada industrijskog procesa
Kontrolno-operativno uzorkovanje	Eksperimentalno uzorkovanje	Naučno-istraživačko uzorkovanje usavršavanje procesa
Kompozitni uzorak	Kompozitni uzorak	Kompozitni uzorak
Obrada uzorka	Obrada uzorka	Obrada uzorka
izdvajanje reprezentativnog uzorka za:	izdvajanje reprezentativnog uzorka za:	izdvajanje reprezentativnog uzorka za:
♦ Vlagu ♦ Hemijski sastav ♦ Granulo sastav	- Vlaga - Hemijski sastav - Granulo sastav ♦ Mineraloška ispitivanja	- Vlaga - Hemijski sastav - Granulo sastav - Mineraloška ispitivanja ♦ Tehnološka ispitivanja
Rezervni uzorak	Rezervni uzorak	Rezervni uzorak

Sl.1.33 Obrada primarnog uzorka iz industrijskog procesa

❑ Usitnjavanje uzorka

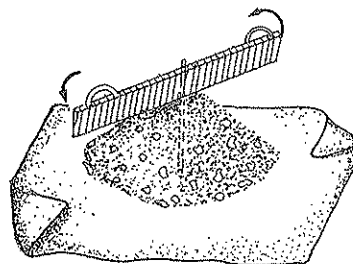
Usitnjavanje i mlevenje uzoraka vrši se laboratorijskim drobillicama različitog delovanja sila a mlevenje u odgovarajućim mlinovima (zavisno od finoće do koje je potrebno uzorak samleti). Detaljnije ćemo se zadržati na postupcima homogenizacije uzoraka, kao neophodne etape obrade u procesu skraćivanja.

❑ Homogenizacija uzorka

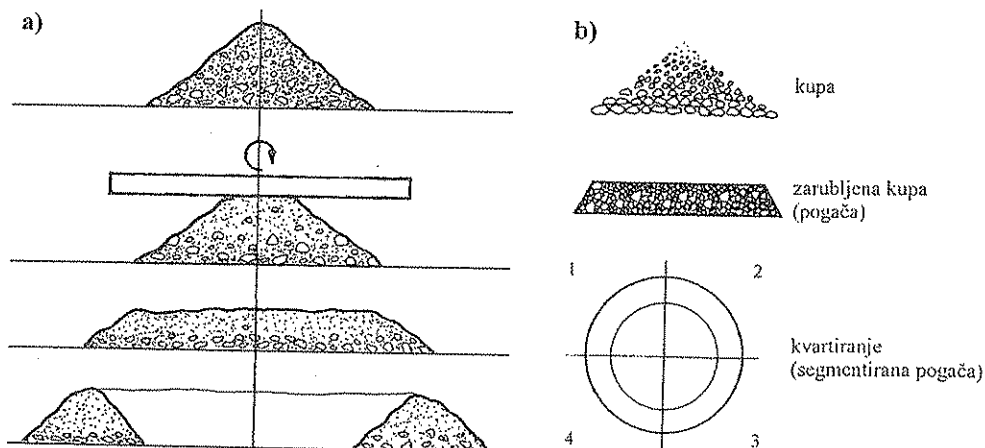
Homogenizacija (ili mešanje) uzorka se mora obaviti temeljno da bi se dobila relativno homogena (izotropna, ravnomerne raspodele korisnog minerala) masa, pre samog postupka njegovog skraćivanja. Način izvođenja homogeniziranja ili mešanja, zavisi od krupnoće komada ili zrna i mase uzorka te se može izvesti na jedan od sledećih načina:

① **Metod kupe.** Homogenizacija po metodu "kupe i koca" sastoji se u tome da se primarni uzorak višestruko, u porcijama, prebacuje sa jedne na drugu gomilu praveći pri tome kupu (Sl.1.35 i Sl.1.36). Ovaj metod se

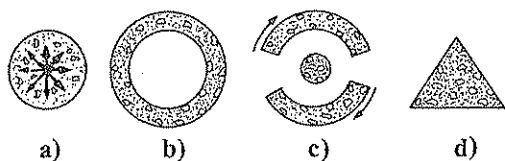
koristi pri relativno većoj masi uzorka (reda veličine 250-2000 kg.) i pri veličini komada ne većih od 50-60 mm. Rastresiti materijal sitno i srednjezrni se može homogenizirati i pri manjoj masi uzorka. Postoji više načina *razvlačenja* kupe u "pogaču", zarubljenu kupu. Jedan od njih je prikazan na slici 1.34., na kojoj je ilustrovan način *razvrtanja* materijala u formu prstena i ponovnog formiranja kupe.



Sl.1.34 Razvlačenje materijala oblika kupe u pogaču ili prsten (pri homogenizaciji i skraćivanju).



Sl.1.35 Homogenizacija sirovine: a – razvrtanje kupe u prsten; b – razvlačenje materijala u zarubljenu kupu (pogaču).



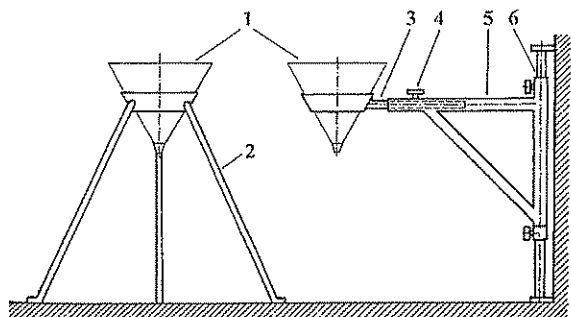
Sl.1.36 Ilustracija homogenizacije uzorka metodom kupe i prstena

Prema N.I. Truškovu, mešanjem se obično obuhvata masa od najviše 2-3 t, pri krupnoći komada 50-60 mm. Ukoliko je uzorak veći od ove količine, potrebno je da se izdela na više delova i da se svaki deo posebno skraćuje.

Homogeniziranje materijala uzorka može se izvršiti mehaničkim putem ili ručno.

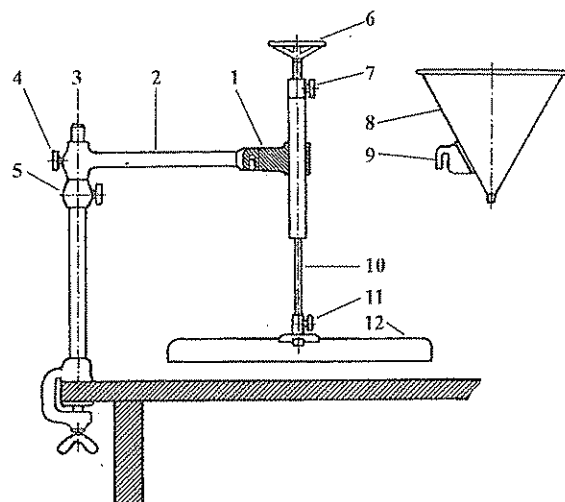
Mehaničko homogeniziranje primenjuje se uglavnom na uzorcima manjih razmera. U ovu svrhu koriste se cilindri koji se rotiraju, kao i obični mlinovi sa kuglama (kugle su za ovu priliku izvađene, kao mešalica za beton). U praksi obrade uzoraka, ručno homogeniziranje je daleko rasprostranjenije.

Homogeniziranje prebacivanjem je vrlo jednostavno. Sastoji se u sledećem: oko gomile čiji materijal treba promešati postave se, obično dva radnika sa lopatama koji uzimaju i prebacuju materijal na drugo mesto, obrazujući drugu gomilu. Materijal se baca na jedno mesto tako da se obrazuje kupa. Da bi se materijal što bolje homogenizirao, ovo prebacivanje uz obrazovanje kupa ponavlja se nekoliko puta. Pri tome se mora posebna pažnja obratiti da se materijal ravnomerno razliva sa vrha kupe po njenim bokovima (padinama), jer pri prebacivanju dolazi do segregacije materijala po krupnoći. Krupniji i komadi sa većom masom briže se kreću i dalje kotrljaju, dok sitniji komadi i zrna ostaju po bokovima kupe. Greška daljeg skraćivanja biće utoliko manja ukoliko je segregacija po krupnoći simetrična u odnosu na vertikalnu osu kupe. To se može postići ako se materijal uvek baca na vrh kupe. Da bi materijal padao direktno na kupu, u mnogim laboratorijama se koristi levak kroz koji se propušta materijal (Sl.1.37 i Sl.1.38).



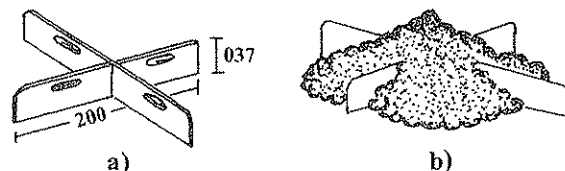
Sl.1.37 Formiranje kupe pri homogenizaciji uz pomoć levka; 1 – levak; 2 – nogare; 3 – teleskopski nosač; 4 – zavrtnj; 5 – horizontalni krak nosača; 6 – vertikalni rotacioni nosač.

Homogeniziranje ovim postupkom primenjuje se naročito uspešno kod uzoraka koji imaju više od 2-3 t materijala. Propuštanje sitnozrnog materijala kroz levak, montiran na nosaču i postavljen na radnom stolu, može sa uspehom da se koristi kod obrade uzoraka (skraćivanja četvrtanjem) vrlo malih masa, kao što su mikroskopska ispitivanja, izrada rudnih preparata i slična.



Sl.1.38 Pribor za homogenizaciju uzorka metodom kupe uz pomoć levka sa krstačem za skraćivanje materijala manjih masa; 1 – nosač levka ili krstača; 2 – horizontalni krak; 3 – vertikalni rotirajući nosač; 4 – matica za fiksiranje; 5 – podešavanje visine; 6 – podizač krstača; 7 – zavrtnj; 8 – levak; 9 – držač levka.

U tim slučajevima materijal se nabacuje na vrh kupe propuštanjem kroz levak čiji je otvor nekoliko puta veći od najkrupnijih komada odnosno zrna u uzorku. Propuštanjem sitnozrnog materijala kroz levak dolazi do pravilne i ravnomerne segregacije materijala po krupnoći, tokom formiranja kupe. U slučaju da se neposredno nakon homogenizacije pristupa skraćivanju uzorka ispod samog levka se može postaviti "krstač" tako da se materijal odmah deli na četiri jednaka dela odnosno kvartira ga. (Sl.1.39).



Sl.1.39 Krstača za deljenje uzoraka

② Homogenizacija po metodu "prekotrlljavanja, valjanja" Koristi se za uzorke ne veće od 20-25 kg. Metod se ne preporučuje za uzorke koji sadrže krupne komade odnosno krupnozrni materijal. Homogeniziranje se izvodi na platnu sa malim masama uzoraka kotrljanjem i međusobnim mešanjem. Ova metoda daje dobre rezultate kod ravnomerno usitnjenog materijala, sa sitnim komadima i zrnima kao i ujednačenom gustinom. U protivnom dolazi do segregacije. Postupak homogenizacije je u sledećem: najčešće fino samleveni uzorak se prospe na, odgovarajuće veličine, mušemu ili tabak papira i naizmeničnim podizanjem jednog kraja, ugla mušeme i primicanje drugom po dijagonali suprotnom uglu vrši kotrljanje, valjanje materijala po mušemi. Naizmenično po obe dijagonale postupak ponoviti više puta. Na ovaj način se najčešće vrši homogenizacija fino samlevenog materijala, pre uzorkovanja za hemijsku analizu.

③ Homogenizacija prosejavanjem. Većinu sitnomelevenog materijala vrlo dobro možemo homogenizirati prosejavanjem na sitima. Uzorak se višekratno prosejava kroz sito koje ima dva do tri puta veće otvore od

najkrupnijih komada ili zrna u uzorku. Tokom prosejavanja se, eventualna pojava zgrudvanog materijala u uzorku, može razbiti na samom situ i time izvršiti potpunu homogenizaciju.

④ **Presipanjem** iz jednog suda u drugi mogu se dobiti dovoljno dobri rezultati kod homogeniziranja uzoraka manjih masa sa vrlo sitno izmlevenom sirovinom. Presipanje uzoraka treba ponoviti 5-8 puta.

⑤ **Mehanicko homogeniziranje** se vrši u specijalnim, za tu svrhu, konstruisanim uređajima, mešalicama. Ovi uređaji mogu biti različitih konstrukcija već prema tome da li se vrši homogenizacija krupnokomadastog ili sitnozrnog materijala; uzorka u suvom stanju ili uzoraka pulpe; zavisno od mase uzorka koji se homogenizira kao i od toga da li se vrši ručno ili automatski, itd. Vreme trajanja mehaničkog homogeniziranja može da bude 10-15 minuta. Manje količine materijala mogu da se mešaju i u takozvanim bubnjevima.

□ Skraćivanje uzorka

Kada se postigne zadovoljavajući stepen homogenosti materijala, smese asocijacije minerala, primenivši jedan od metoda homogenizacije, pristupa se skraćivanju ukupne mase uzorka, imajući stalno u vidu reprezentativnost uzorka odnosno $Q_{min} = f(d)$. Naravno, skraćivanje uzorka može da se vrši samo u tom slučaju ako je masa skraćenog uzorka ne manja od dvostruke mase minimalno dozvoljene količine određene po odgovarajućoj jednačini. U suprotnom slučaju operaciju skraćivanja uzorka treba započeti sa drobljenjem-smanjivanjem krupnoće komada rude.

Skraćivanje se vrši na različite načine zavisno od krupnoće materijala i ukupne mase uzorka. U praksi se najčešće koriste:

- kvartiranje (čtvrtnje)
- metod šah polja
- frakciono izdvajanje
- metod presecanja kanala
- metod kvadrata
- skraćivanje uz pomoć mehaničkih razdeljivača
 - žljebasti razdeljivači (džonsov razdeljivač, razdeljivačke kutije)
 - rotacioni razdeljivači
 - vibracioni razdeljivači i dr.

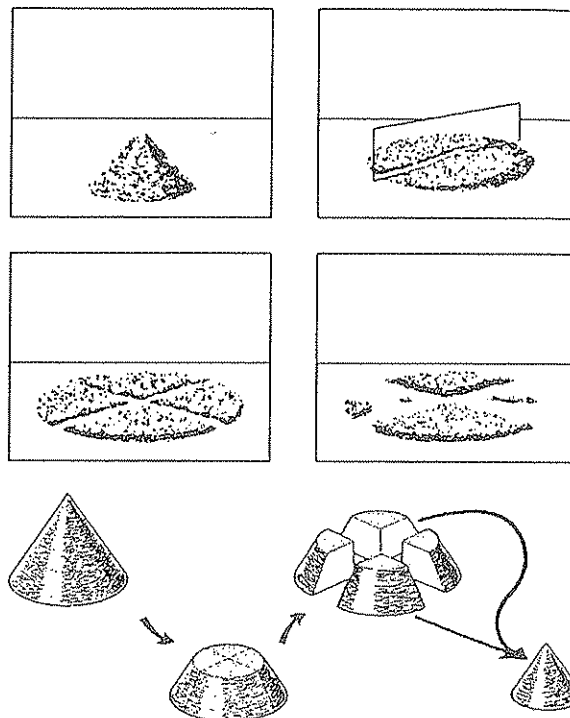
Razmotrićemo samo neke najčešće korišćene postupke.

1.5.3 KVARTIRANJE (ČETVRTANJE)

Temeljno homogeniziran materijal, sakupljen na gomili u formi kupe, se pažljivo razvlači u tanku "pogaču" odnosno formu diska. Tako dobijena površina se "raseče" odnosno podeli lenjirom na četiri jednaka dela, a skraćivanje se vrši tako da se dva dijagonalno suprotna kvadranta (I i III kvadrant) spajaju ostvljavajući ih kao rezervu a preostali materijal iz dva kvadranta (II i IV kvadrant) spaja i predstavlja skraćeni uzorak. Ukoliko krupnoća materijala i njegova masa to dozvoljavaju, dalje skraćivanje je moguće ponoviti, naravno uz predhodnu intenzivnu homogenizaciju.

Treba posebno posvetiti pažnju izdvajanju okonture-nih četvrtinki uzorka, jer čak i pri pažljivom radu dolazi do osipanja i mešanja materijala, ovlaš označenih se-

gmenata, naročito krupnijih knada i zrna. Da bi se ovo izbeglo pojedini uzorkovači koriste drvenu krstaču sa visokim, desetak santimetara, stranicama koju postavljaju na ravnu podlogu pre samog formiranja kupe odnosno pogače. Time se postupak skraćivanja obavlja pedantnije i jednostavnije. Izvesno poboljšanje kod kvartiranja postignuto je primenom krstova u obliku piramida. Na dve suprotne strane nalaze se trouglasti zaklopki od lima, koji se preko jedne poluge otvaraju i na taj način prazne pregrade.



Sl.1. 40 Ilustracija postupka kvartiranja uzorka

Ovaj metod skraćivanja predstavlja najčešće korišćen postupak, a osnovne prednosti su mu sledeće:

- primenljiv je na sve krupnokomadaste ili sitnozrne materijale (gubitak materijala pri ovom postupku skraćivanja je minimalan);
- komfornost rada i jednostavnost operacija skraćivanja (tačnost sprovođenja skraćivanja je očigledna);
- mogućnost naizmeničnosti i usklađivanja sprovođenja operacije skraćivanja i homogenizacije.

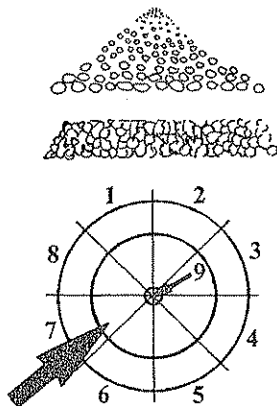
Međutim, skraćivanje metodom kvartiranja ima i svojih nedostataka:

- operacija skraćivanja zahteva dosta vremena;
- tačnost uzorkovanja u znatnoj meri zavisi od spretnosti i pažljivosti uzorkovača;
- relativna niska nehomogenost materijala uslovljena segregacijom materijala po krupnoći tokom formiranja kupe odnosno "pogače", a takođe i neravnomernim razmeštajem krupnih komada sirovine pri ovim operacijama.

1.5.4 METOD "DEVET TAČAKA"

Ovaj metod skraćivanja (izdvajanja) uzoraka nazvan postupak "devet tačaka" se vrlo često koristi. Postupak se primenjuje kod fino samlevenih uzoraka odnosno suvih praškastih materijala malih masa. Izdvajanje uzoraka se

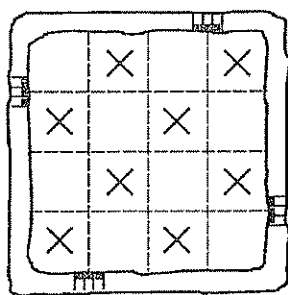
izvodi na sledeći način: homogeniziran materijal razvučen u pogaču i poravnat, pažljivo se izdela na osam segmenata. Iz svakog od osam radijalno zrakastih segmenata izdvaja se špahtlom manja količina materijala, a deveta tačka se uzima iz samog centra pogače. Postupak izvođenja skraćivanja uzorka prikazan je na slici 1.41.



Sl.1.41 Skraćivanje, izdvajanje uzorka metodom "devet tačaka"

1.5.5 METOD "ŠAHOVSKIH POLJA"

Kod uzorkovanja materijala za hemijsku analizu, ali i sva druga uzorkovanja u laboratorijama za PMS, najčešće se koristi kao postupak skraćivanja metod šahovskih polja. Uzorak se nakon dobre homogenizacije razvuče u pogaču ujednačene debljine, izdela sa nizom međusobno upravnih linija (na rastojanju koje je nešto šire od pribora sa kojim se vrši uzorkovanje - špahtla ili lopatica) i po analogiji sa šahovskom tablom, uzimaju se manje količine materijala sa "belih" polja a izostavljaju "crna" polja. Postupak se, ukoliko je potrebno, može ponoviti i više puta. Sl. 1.42.



Sl.1.42 Izdvajanje uzoraka metodom "šahovskih polja"

1.5.6 FRAKCIONO (PARCIJALNO) IZDVAJANJE UZORAKA

Ovaj postupak skraćivanja uzorka se sastoji u tome da se od materijala, koji treba da se skraćuje, pri homogenizaciji ili samo prebacivanju sa jednog na drugo mesto, izdvoji svaka n -ta porcija (lopata) na stranu. Nedostaci ovoga metoda su: poteškoće primene ako su u materijalu prisutni krupniji komadi; pri krupnoći materijala preko 50 mm tačnost postupka se znatno snižava i dovodi u pitanje; pored toga, masa materijala i broj komada u pojedinim porcijama (lopata) će biti jako promenljiv; moguće su i greške u brojanju porcija koje treba odvojiti u toku rada. Ovaj postupak formiranja te-

hnološkog uzorka primenjuje se i u slučajevima kada se u toku transporta sirovine od radilišta na rudniku do pogona za PMS odvaja svaki n -ti natovareni vagonet.

1.5.7 METOD PROSECANJA KANALA

Ovaj postupak može da se primeni na skladištane materijale (sirovine, prirodo koncentracije) čije mase iznose do 100 t. Materijal, nasut na gomilu ili u formu kupe, se razvlači i gomila se oblikuje u formu pravougaonog paralelopipeda visine do 0,5 m. Zatim se, kroz tako dobijen sloj materijala, preseku dva međusobno upravna kanala širine do 0,30 m. Ukoliko se zidovi kanala jako osipaju i zarušavaju sav materijal se stavlja na stranu, obrađuje i skraćuje za dalji rad u laboratoriji. Ukoliko su zidovi kanala stabilni i materijal se ne osipa i zarušava, uzorci se mogu izdvajati sa obe strane zidova kanala, praveći vertikalne žljebove, brazde razmera 6x20 cm. Ovakve brazde mogu da se prave na svakih 0,5 m. Na ovaj način možemo dobiti reprezentativne uzorke znatno manjih razmera od polazne mase. Ovaj metod se može primeniti kod sitnozrnog istorodnog materijala (neke sirovine, koncentrata, jalovine). S druge strane kod materijala koji sadrže krupnije komade, zidovi kanala se zarušavaju i osipaju tako da u uzorak dospevaju krupniji komadi.

1.5.8 ŽLJEBASTI RAZDELJIVAČI

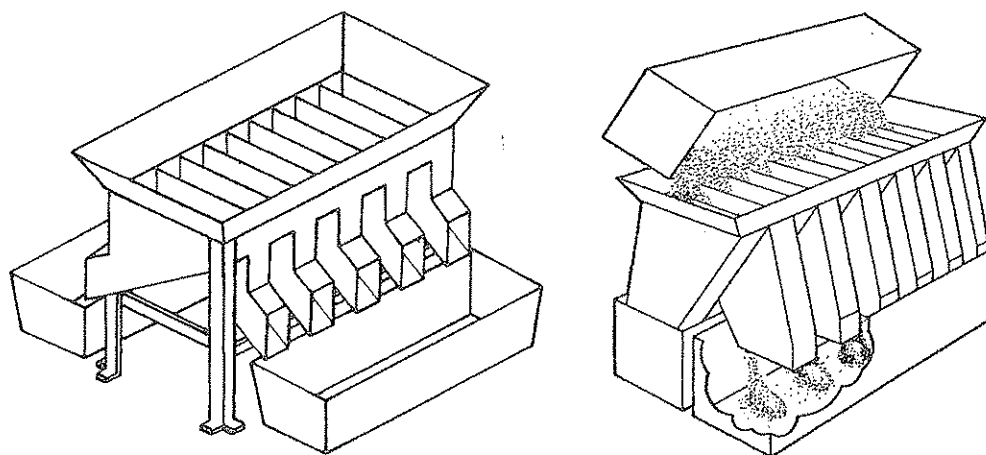
Najrasprostranjeniji uređaji za skraćivanje uzoraka u laboratorijama svakako su žljebasti razdeljivači, i smatraju se vrlo pouzdanim. U ovu grupu spadaju i mikrorazdeljivači, sandučasti razdeljivači i drugi. Sama konstrukcija razdeljivača je vrlo prosta, međutim njihova izrada mora biti vrlo precizna.

1.5.9 DŽONSOV RAZDELJIVAČ

Džonsov razdeljivač se vrlo često upotrebljava u praksi pošto je skraćivanje uzoraka njime vrlo jednostavno i u poređenju sa kvartiranjem ekonomičnije, a daje dovoljno tačne rezultate. Džonsov razdeljivač se sastoji od više kanala - pregrada koji polaze iz zajedničkog prihvatišta (Sl.1.43). Ove pregrade su postavljene pod uglom od 50°; upravljene su u dva različita smera, pri čemu svaka druga ima isti smer. Sve pregrade - kanali imaju jednake dimenzije. Tačnost skraćivanja biće utoliko veća ukoliko je veći broj pregrada - kanala, a manje njihove širine. Kod Džonsovih razdeljivača broj pregrada obično iznosi 16 - 20, retko ispod 10.

Džonsovi razdeljivači izrađuju se u različitim dimenzijama, krupniji materijal propušta se kroz razdeljivače sa većim profilom kanala - pregrada, a sitniji materijal kroz manje Džonsove razdeljivače. Širina ovih pregrada treba da je 3-4 putaveća od prečnika najkrupnijih zrna - komada uzorka koji se skraćuje.

Skraćivanje se vrši na taj način što se materijal uzme lopatom čija je širina jednaka širini gornje površine razdeljivača i izruči neposredno iznad kanala provodnika (umesto lopate može se upotrebiti i sandučić odgovarajućih dimenzija). Materijal se neposredno preko kanala deli na dva, manje-više jednaka dela. Na kraju kanala prihvata se materijal u dve, po veličini jednake kutije ili sanduka. Jedna polovina uzorka se odlaže na

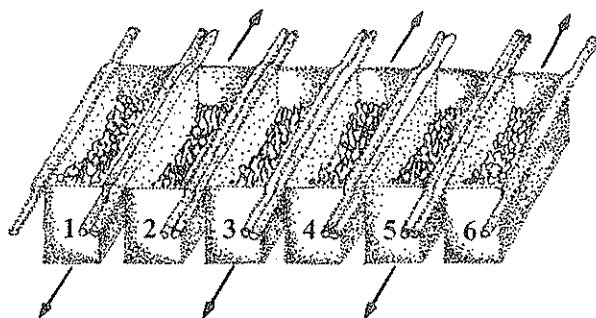


Sl.1.43 Džonsov razdeljivač

stranu, dok se druga, ukoliko je potrebno, dalje skraćuje, propuštanjem materijala kroz razdeljivač. Pri tome treba imati u vidu da tačnost skraćivanja uzorka u mnogome zavisi od ravnomernosti nasipanja materijala u razdeljivač.

1.5.10 RAZDELJIVAČKE KUTIJE

Razdeljivačke kutije se primenjuju u nekim slučajevima pri skraćivanju velikih uzoraka sa krupnoćom zrna odnosno komadića 10-25 mm. Kutije su istih dimenzija (širina kutija zavisi od prečnika komadića koji čine uzorak, širina kutija mora biti najmanje dva puta veća od prečnika najkrupnijih komada sirovine). Pri skraćivanju se uzima paran broj kutija. Kutije se poredaju jedna do druge, paralelno svojim dužim stranama i napune se pomoću lopate, čija širina zavisi od ukupne širine svih kutija. Pri punjenju, ivica lopate treba da je paralelna širini ovih kutija, tako da je punjenje u svim kutijama ravnomerno. Pošto su kutije napunjene, materijal iz svake druge kutije se odvaja kao skraćeni uzorak, dok se druga polovina odlaže kao rezerva. Dalje skraćivanje, već skraćenog uzorka, vrši se na isti način, a bolji rezultati se postižu ukoliko je broj kutija veći.



Sl.1.44 Razdeljivačke kutije za skraćivanje uzoraka

1.5.11 MEHANIČKI RAZDELJIVAČI

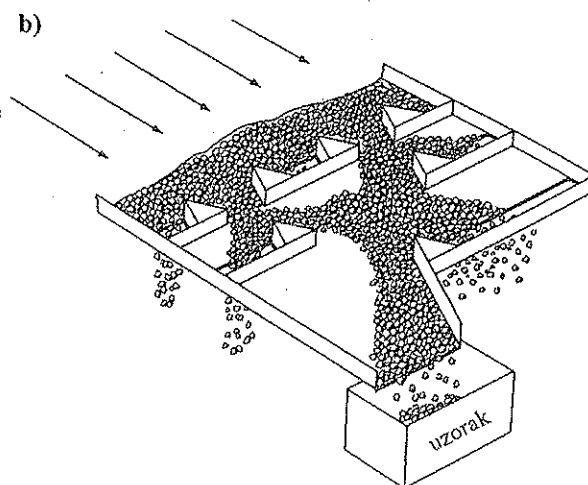
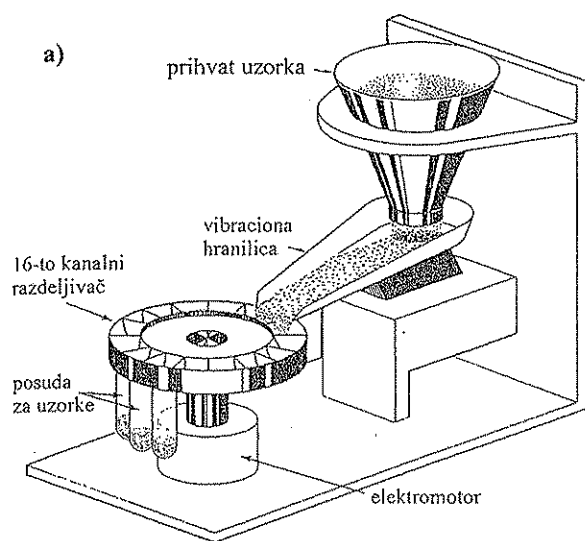
Za skraćivanje uzoraka većih masa najbolje je primeniti mehaničke razdeljivače, velikih kapaciteta, neprekidnog dejstva (rotacioni razdeljivači, vibracioni razdeljivači i drugi).

Obrada uzoraka koji sadrže samorodne kovne minerale zaslužuju poseban tretman pri skraćivanju. Naime, u rudama, koncentratima, šljakama i nekim drugim proizvodima PMS i metalurške prerade mogu se naći relativno krupna zrna metalinih minerala odnosno kovnih samorodnih elemenata.

Postojanje samorodnih minerala ili onih sklonih kovnosti obično imaju znatnog uticaja na tačnost uzorkovanja naročito u poslednjim stadijumima obrade kada dimenzije zrna ne prelaze 2-3 mm. Uzrok nastanka grešaka uzorkovanja zbog postojanja zrna ili čestica koje su kovne objašnjavaju se time što se te čestice ne usitnjavaju tokom mlevenja već dolazi do kovanja i plastičnih deformacija, odnosno čestice se raskivaju u pločice pojedinačno ili više njih zajedno. Time se u toku mlevenja ne povećava broj ovih čestica za razliku od drugih minerala, tako da pri skraćivanju uzorka dolazi do veće koncentracije u jednom delu uzorka za razliku od drugog dela ili druge polovine, gde će biti značajno osiromašenje. Da bi se izbegle greške ove vrste, iz ovakvih uzoraka, sa minealizacijom koja pokazuje izrazitu kovnost, se mora obavezno odstraniti onaj deo najsitnijeg materijala odsejavanjem, pranjem ili bilo kojim drugim postupkom PMS i analizirati posebno. Neophodnost specijalnih postupaka obrade uzoraka, koji sadrže minerale gore pomenutih osobina određuju se prethodnim ispitivanjima na posebno izdvojenim uzorcima i njihovim skraćivanjem. Tako što se jedan deo skraćuje uz operaciju pranja, dok se drugi ne odmuljuje, odnosno pere. Ukoliko nema razlika u analizi postupak skraćivanja se može obaviti bez prethodnih radnji (odsejavanje, pranje i dr.).

1.5.12 OBRADA UZORKA PULPE

Uzorci pulpe iz različitih faza industrijskog procesa koji stižu u laboratorije moraju se podvrgnuti nizu sukcesivnih operacija koje se sastoje od skraćivanja, odvođenja (filtriranja i sušenja), mlevenja, uzorkovanja za hemijsku laboratoriju i dr. Ukoliko je primarni uzorak pulpe većih masa prvo se pristupa njihovom skraćivanju. Sledeći korak je odvođivanje koje se odvija postepeno: dekantacijom (često i odmuljivanjem), filtriranjem i sušenjem. Šema obrade uzorka pulpe data je na sl.1.46.



Sl.1.45 Ilustracija mehaničkog skraćivanja uzorka, razdeljivači neprekidnog dejstva. a – Rotacioni laboratorijski razdeljivač; b – Razdeljivački sto.

1.5.13 OPŠTE NAPOMENE KOD SASTAVLJANJA ŠEMA OBRADE UZORAKA

Izbor šeme obrade uzorka određen je mineralno-petrografskim sastavom sirovine: karakteristikama krupnoće; masom uzorkovanog materijala; uslovima izdvajanja uzorka. Mineralono-petrografski sastav materijala određuje izbor koeficijenta k i pokazatelj eksponenta α u jednačini za minimalno dozvoljenu masu uzorka. Karakteristike krupnoće materijala određuju koliki treba da bude stepen usitnjavanja

$$\varepsilon = d_1/d_m$$

posmatrajući od polaznog, primarnog uzorka Q_1 ka konačnom uzorku Q_m pri stepenu skraćivanja izraženom kao

$$S = Q_1/Q_m$$

gde su:

d_1 - prečnici najkrupnijih komada u polaznom uzorku (mm);

d_m - prečnici najkrupnijih komada u konačnom uzorku (mm);

Q_1 - masa polaznog (primarnog) uzorka (kg);

Q_m - masa konačnog (skraćenog) uzorka (kg).

Pri skraćivanju uzorka, u šemi obrade uvek se uključuje predhodno i kontrolno klasiranje. Kod izbora stepena skraćivanja, određenog za jedan stadijum, on se može odrediti po obrascu

$$Q_m > S \cdot k \cdot d_{m+1}^2$$

gde su:

Q_m - masa skraćenog uzorka (kg);

d_{m+1} - prečnici najkrupnijih komada u skraćenom uzorku (mm).

Kod izbora stepena usitnjenosti $\varepsilon = d_n/d_{n+1}$ određuje se i stepen skraćivanja $S = Q_n/Q_{n+1}$.

Broj stadijuma skraćivanja i odnos stepena usitnjenosti prema skraćivanju izvodi se iz jednačina:

ako je

$$Q_n = k \cdot d_n^2 \quad i$$

$$Q_{n+1} = k \cdot d_{n+1}^2$$

tada je

$$Q_n / Q_{n+1} = d_n^2 / d_{n+1}^2$$

odnosno

$$\varepsilon = d_n / d_{n+1} = \sqrt{Q_n / Q_{n+1}} = \sqrt{R},$$

tj. neophodan stepen usitnjavanja ε je jednak kvadratnom korenu iz zadatog stepena skraćivanja uzorka. Pri postupku skraćivanja metodom kvartiranja uzorak se posle svakog stadijuma skraćuje dva puta (odnosno uzorak se prepolovi),

$$Q_n = 2Q_{n+1}$$

broj postupaka skraćivanja u jednom stadijumu m kod kvartiranja će biti

$$Q_n / Q_{n+1} = 2^m$$

iz toga sledi stepen usitnjenosti

$$\varepsilon = \sqrt{2^m} = 2^{m/2}$$

$$\log \varepsilon = 0,5 m \log 2 \quad \text{ili}$$

$$m = 2 \log \varepsilon / \log 2 = 2 \log \varepsilon / 0,301 = 6,65 \log \varepsilon$$

❖ ❖ ❖

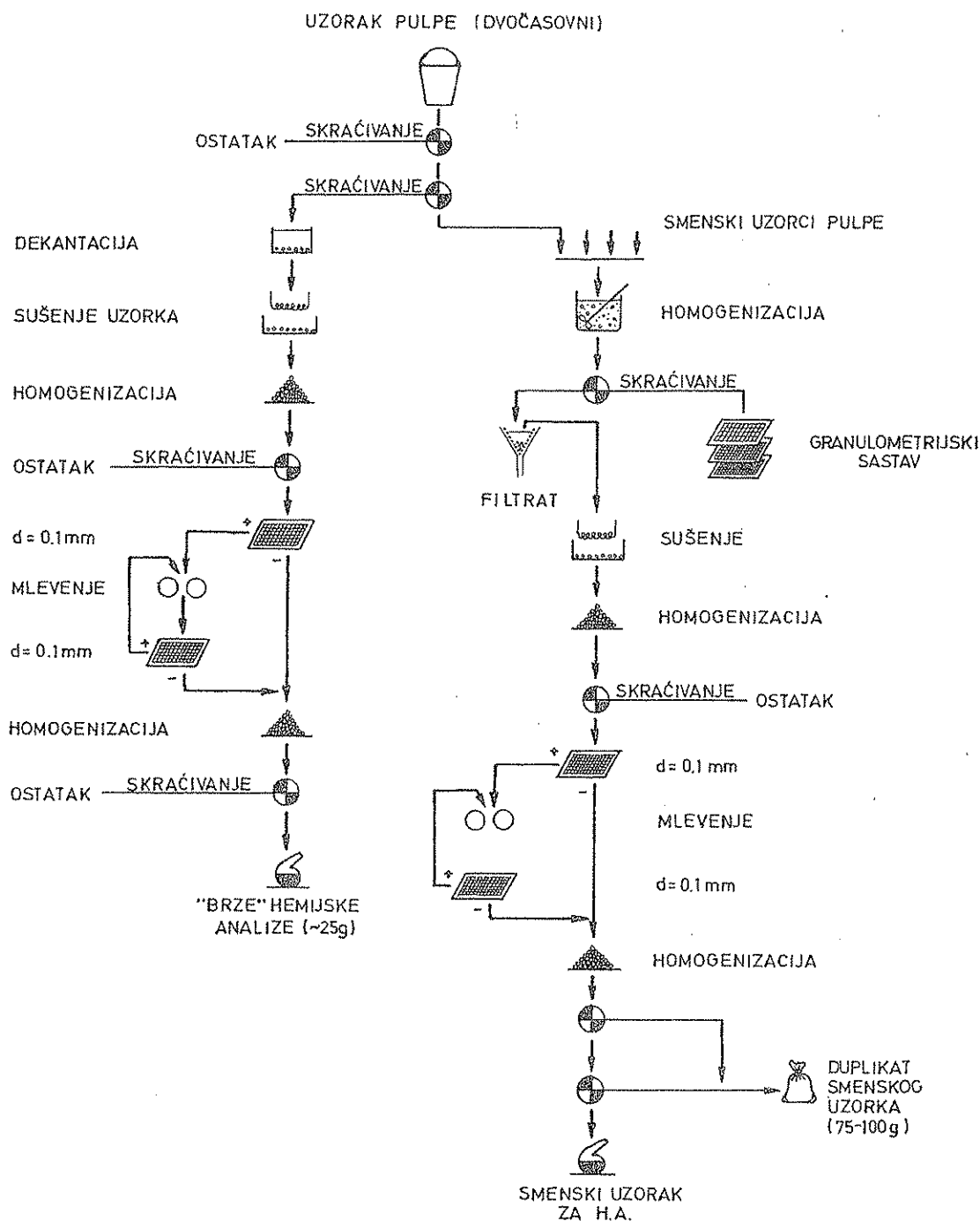
Pri svakom skraćivanju, metodom kvartiranja ili nekim od žljebastih razdeljivača (tipa Džonsa), uzorak se deli na dva manje-više jednaka dela. Prema tome, ukoliko je primarni uzorak (Q_{prim}), podvrgnut skraćivanju, N puta veći od minimalno potrebnog uzorka (Q_{min}), broj skraćivanja m u jednom stadijumu, takvog uzorka, se određuje prema obrascu:

$$m = 3,32 \cdot \log N$$

gde je N dato izrazom

$$N = \frac{Q_{prim}}{Q_{min}}$$

Ukoliko pri tome m nije ceo broj, treba ga zaokružiti na ceo.



SI.1.46 Obrada uzoraka pulpe

❖ ❖ ❖
 * Primer: primarni uzorak sirovine ukupne mase od 800 kg, treba skratiti do minimalne dozvoljene količine. Za ovu sirovinu su poznati: krupnoća najkrupnijih komada $d_{\max} = 30 \text{ mm}$ i utvrđen koeficijent $k=0,20$; određena je $Q_{\min} = 0,20 \cdot 900 = 180 \text{ kg}$. Pri ovoj krupnoći materijala uzorak se može skratiti

$$m = 3,32 \cdot \log \frac{Q_{\text{prim}}}{Q_{\min}} = 3,32 \cdot \log \frac{800}{180} = 2,16$$

odnosno, primarni uzorak mase 800 kg može da se skрати 2 puta. Kako se iz navedenog primera vidi N u stvari predstavlja stepen usitnjenosti (ϵ).

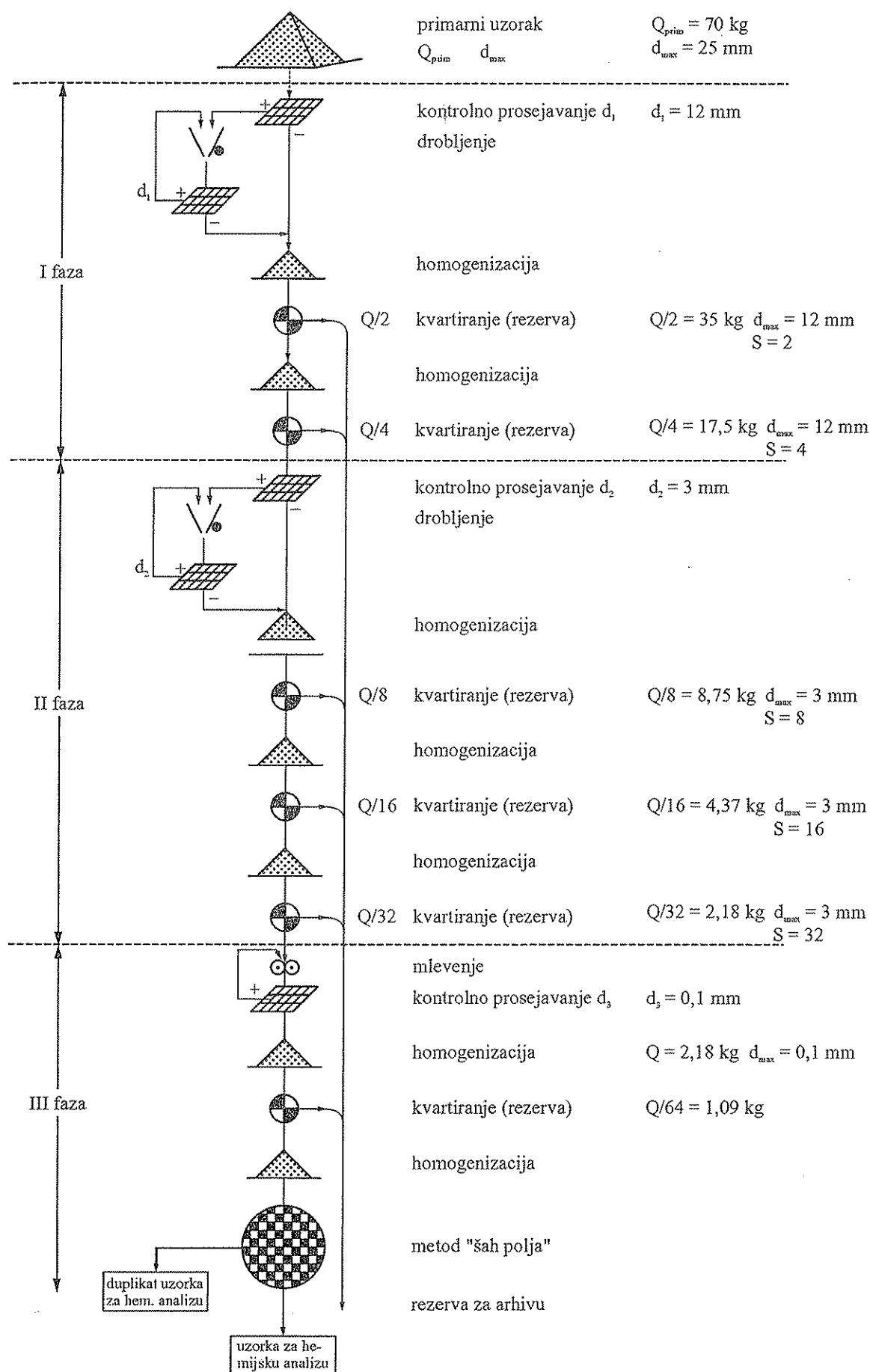
Neki istraživači gornju jednačinu prikazuju u nešto izmenjenom obliku

$$m = 3,3 \cdot \alpha \cdot \ln \epsilon$$

gde su:

α - eksponent iz obrasca $Q_{\min} = k d_{\max}^{\alpha}$;
 ϵ - stepen usitnjavanja.

(Opšti stepen skraćivanja se izračunava $S = Q_n / Q_{n+1} = 2$, gde su: S -stepen skraćivanja; Q_n -masa primarnog uzorka; Q_{n+1} -masa konačnog uzorka dobijenog posle m puta skraćivanja; m -broj skraćivanja u jednom stadijumu.)



SI.1.47 Primer jedne šeme obrade uzorka

♣ **Primer:** Primarni uzorak sirovine ima masu $Q_{\text{prim}} = 70$ kg pri krupnoći najkrupnijih komada od $d_{\text{max}} = 25$ mm. Za datu sirovinu i tip mineralizacije određen je koeficijent (ravnomošnosti mineralizacije) $k = 0,1$. Postavlja se pitanje kolika je minimalno potrebna količina sirovine da bi uzorak bio reprezentativan? A zatim je prikazano kako se vrši obrada uzorka sa skraćivanjem i kao je izdvojen reprezentativan uzorak za hemijsku analizu. Postupak je prikazan dijagramom, uz odgovarajući opis izvršene operacije.

Za dati tip rude, i krupnoću komada određeno da se može koristiti Demond-Halferdalov princip za utvrđivanje minimalne mase reprezentativnog uzorka. Prema jednačini $Q_{\text{min}} = k d_{\text{max}}^\alpha$ u kojoj je $k=0,10$ a $\alpha=2$ dobijamo da je $Q_{\text{min}} = 62,5$ kg.

Prema tome uzorak je reprezentativan i pri datoj krupnoći se ne može dalje skraćivati. U daljem postupku se smanjivanjem krupnoće komada (usitnjavanjem pomoću drobilice) na $d=12$ mm sirovina može skratiti do $Q_{\text{min}} = 14,4$ kg. Pri $d=3$ mm uzorak se može skratiti do masa od $Q_{\text{min}} = 1,1$ kg. Na kraju, samleveni uzorak, do krupnoće ispod $0,1$ mm može biti, metodom šah polja, skraćen za hemijsku analizu. Na slici 1.47 prikazan je postupak obrade uzorka po fazama.

Na kraju ovoga poglavlja biće prikazan primer jedne šeme obrade primarnog uzorka i dovođenje materijala na tehnički adekvatan za određena ispitivanja.

1.6 GREŠKE UZORKOVANJA I GREŠKE SKRAĆIVANJA

Za utvrđivanje kvalitativno-kvantitativnih parametara jedne sirovine vrše se merenja njihovih vrednosti. Pod merenjima se podrazumeva upoređivanje merene veličine sa drugom veličinom koju smo prihvatili za jedinicu merenja odnosno za etalon, ili drugim rečima, merenje je utvrđivanje nepoznate preko poznate veličine. Pri merenjima se ne dobija "prava" vrednost parametra, što je u tesnoj vezi sa osobinama pribora kojim se meri, svojstvima objekata i uslovima u kojima se vrše merenja. Greške merenja određenih veličina, pri kontroli parametara, ne bi smele biti veće od nekih zadatih graničnih vrednosti. Tako imamo:

$$\Delta x = x_i - \bar{x}$$

gde su:

Δx - greška merenja (određivanja);

x_i - veličina dobijena eksperimentalnim merenjem;

$\bar{x}$ - prava veličina (srednja vrednost).

Greške uzorkovanja mogu nastati usled različitih uzroka: neravnomernosti mineralizacije uzorkovane mase sirovine, nepravilne graduisanosti pribora za merenje, greške koje čini sam uzorkivač i mnogih drugih.

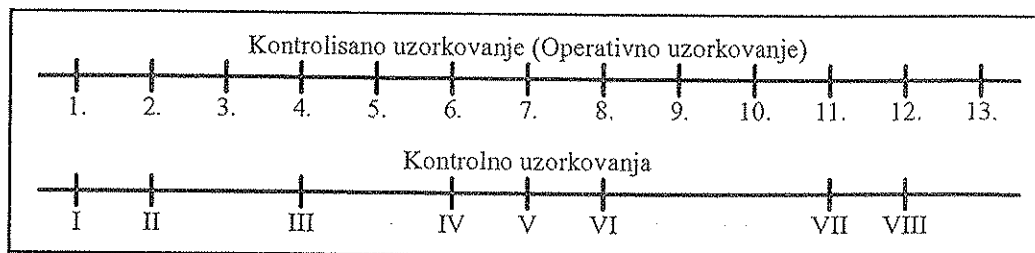
Međutim, sve greške uzorkovanja Δx , koje nastaju pri kontroli tehnološkog procesa, možemo podeliti na tri kategorije: *grube greške, sistematske greške i slučajne greške.*

□ **Grubim greškama** (omaške, promašaji, pogreške) se nazivaju one greške koje po svojoj veličini znatno prevazilaze dopuštene granice i prema tome rezultati određivanja tražene veličine jako odskakuju od ostalih veličina. Ovakve greške nastaju najčešće usled nepoštovanja osnovnih pravila uzorkovanja ili usled vrlo nepravilne raspodele korisnog minerala u masi koja se uzo-

rkuje, kao na primer, u slučaju gnezdistog razmeštaja ispitivane komponente u sirovini ili slučaja kada su u sirovini (šljunkovi, peskovi) prisutni krupniji "nugeti" (samci) zlata. Uzroke nastajanja grubih grešaka, u većini slučajeva, je moguće utvrditi.

□ **Sistematskim greškama** se nazivaju greške koje su po svojim vrednostima stalne, neprestalno se javljaju ili se pravilno menjaju. Pri tome uzroci javljanja grešaka nisu slučajni, već izvesni ili čak mogu biti izazvani. Sistematske greške nije moguće otkloniti ili umanjiti kroz ponavljanje opita ili putem povećanja broja uzoraka. Sistematske greške su karakteristične za promenljive i nestabilne tehnološke procese.

□ **Slučajne greške** nastaju kao posledica, stohastičke tj. slučajne raspodele korisne komponente u sirovini. One su, po pravilu, uslovljene različitim uzrocima koje je teško utvrditi. Isključivanje ovih grešaka, u potpunosti, nije moguće, a njihov uticaj je moguće samo svesti na razumnu meru, pod uslovom da poznajemo zakonitosti, kojima se podčinjavaju slučajne greške. Same slučajne greške predstavljaju slučajnu veličinu, one mogu primiti različite vrednosti, obrazujući pravilnu krivu normalne raspodele Gausa. Kontrola uzorkovanja i pojava mogućih grešaka, koje se pri tome mogu javiti, moguće je najčešće utvrditi praćenjem kvaliteta mineralne sirovine. Prema tome, kontrola uzorkovanja može se najbolje izvršiti postupkom naknadnog izdvajanja uzoraka, čiji je položaj delom nezavistan od ranije izdvojenih uzoraka. Ovakvim kontrolnim uzorkovanjem operativnog (kontrolisanih uzoraka) uzorkovanja može se ustanoviti eventualno postojanje sistematske greške i brižljivost izdvajanja uzoraka.



Sl.1.48 Ilustracija kontrole uzorkovanja sa položajem kontrolnih uzoraka prema kontrolisanim (operativnim) uzorcima.

1.6.1 GREŠKE SKRAĆIVANJA

Razlika između sadržaja korisne komponente u nekom skraćenom (obrađenom) uzorku i sadržaja iste korisne komponente u početnom uzorku (primarnom uzorku) poznata je pod imenom greška skraćivanja. Ova odstupanja zavise od niza faktora. Tako, sve greške obrade uzoraka mogu se podvesti uglavnom pod *statističke i tehničke*.

1.6.2 STATISTIČKE GREŠKE

Sa povećanjem broja pojedinačnih tačaka (n) smanjuje se greška skraćivanja P_{sk} , ali je uvek veće od nule. Iz ovoga proizilazi da će greška uvek postojati bez obzira na veličinu k i α od kojih zavisi masa uzorka. Ova greška je u suštini statistička, a broj zrna-čestica uzorka i njihova masa, koja određuje veličinu greške, mogu se tretirati kao statističke varijante. Pravilnim izborom za k i α može se u većini slučajeva statistička greška svesti na vrlo malu, skoro zanemarljivu vrednost (videti: eksperimentalno određivanje k i α). Posebnu pažnju treba posvetiti pri obradi uzoraka zlatonosnih ruda u kojima se javljaju krupne i kovne čestice zlata, statističke greške mogu dostići visoke vrednosti, i pored toga što su uzete dovoljne velike vrednosti za k i α .

1.6.3 TEHNIČKE GREŠKE

U procesu obrade uzoraka mogu usled nebrzižljivog rada i nesavršenstva korišćenih uređaja nastati znatne greške. Tehničke greške mogu nastati iz više razloga.

♦ Sistematske greške mogu biti posledica gubitka bogatijih ili siromašnijih najsitnijih klasa. Gubici se javljaju u svakoj operaciji obrade uzoraka - homogenizaciji,

osnovnom i kontrolnom prosejavanju, drobljenju, skraćivanju.

♦ Homogenizacijom uzorka sa zaostalim česticama ranijih uzoraka mogu se javiti greške, kako pozitivnog tako i negativnog znaka. Na ovo su naročito osetljivi uzorci svedeni na male mase; kod uzoraka od preko nekoliko kilograma, gubici, osiromašenje i "kontaminaciju" mogu se svesti na najmanje skoro zanemarljive veličine.

♦ Na tačnost obrade uzoraka veliki uticaj ima homogenizacija.

♦ Sem grešaka koje se javljaju u procesu obrade uzoraka, tačnost određivanja sadržaja korisne komponente u uzorku zavisi i od greške laboratorije. Ukupna greška laboratorije obuhvata greške vezane sa procesom izrade analiza i uzimanjem uzoraka za analize.

1.6.4 KONTROLA HEMIJSKIH ANALIZA

U hemijske laboratorije se često, radi kontrole, šalju kontrolni (paralelni) uzorci na analizu, kako bi se eventualno utvrdila odstupanja i moguće greške analize. Eventualne pojave sistematske greške, se utvrđuju poređenjem srednje vrednosti analiza sa utvrđenim sadržajem elementa u standardnom uzorku. *Unutrašnja kontrola hemijske laboratorije*, u kojoj se inače vrše osnovne analize, se izvodi slanjem na analizu nekoliko paralelnih uzoraka pod šifrom. Dok se *spoljašnja kontrola* obavlja u nekoj drugoj, kadrovski i tehnički bolje opremljenoj laboratoriji. Unutrašnja kontrola se ostvaruje na duplikatima i rezervama uzoraka, tokom tekućeg rada na osnovnim analizama. Broj kontrolnih uzoraka treba da bude dovoljan da bi se mogao dati pouzdan sud o radu laboratorije. Ilustracija kontrole uzorkovanja može se videti na slici 1.48. Odgovarajući primer obrade rezultata pri kontroli uzorkovanja dat je u tablici 1.22.

Tablica 1.22 Prikaz obrade rezultata pri kontroli analiza uzoraka (Sagradyan i dr., 1983.)

Kontrolni uzorci		Kontrolisani uzorci		Razlika $x_k - x_o$	Otklon	Kvadrat otklona
Broj uzorka, duplikat	Sadržaj metala, %	Broj uzorka	Sadržaj metala, %	$z_i = (x_k - x_o) \cdot 100 / x_k$	$z_i - \bar{z}_i = \Delta z$	$(\Delta z)^2$
101	0,84	117	0,90	7,10	-5,2	27,04
102	1,20	118	1,08	10,0	-2,3	5,29
...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...
116	2,12	132	1,99	6,10	-6,2	38,44
Σn_k	Σx_k	Σn_o	Σx_o	Σz_i	$\Sigma \Delta z$	$\Sigma (z_i - \bar{z}_i)^2$
=16	=19,52	=16	=17,12	=196,8	=0,0	=3601,22

$$\bar{x}_k = \frac{\Sigma x_k}{\Sigma n_k} = 1,22$$

srednja aritmetička sredina sadržaja komponente u kontrolnim uzorcima.

$$\bar{x}_o = \frac{\Sigma x_o}{\Sigma n_o} = 1,07$$

srednja aritmetička sredina sadržaja komponente u kontrolisanim uzorcima (osnovni uzorci).

$$\bar{z}_i = \frac{\Sigma z_i}{\Sigma n_i} = \sqrt{\frac{\Sigma \frac{x_k - x_o}{x_k} \cdot 100}{\Sigma n_i}} = 12,3$$

$$\sigma_{zi} = \sqrt{\frac{\Sigma (z_i - \bar{z}_i)^2}{n-1}} = 15\%$$

$$m = \frac{\sigma_{zi}}{\sqrt{n}} = 3,70\%$$

Greška (m) određivanja srednjeg aritmetičkog sadržaja korisne komponente u sirovini (srednja kvadratna greška sadržaja), data je gornjim izrazom. U jednačini σ_m je srednje kvadratno odstupanje.

$$P = \pm \frac{m}{\bar{z}_i} \cdot 100 \quad (\%)$$

Relativna srednja greška (P), izražena u procentima u odnosu na aritmetičku sredinu. Često se (P) naziva i pokazatelj tačnosti uzorkovanja.

$$f = \frac{\bar{x}_k}{\bar{x}_0}$$

Srednja vrednost sistematske greške data gornjim izrazom. Što ujedno predstavlja popravni koeficijent.

1.6.5 GREŠKE OBRADU UZORAKA

Greške obrade uzoraka mogu biti slučajne i sistematske. Kao uzroci nastajanja slučajnih grešaka pri skraćivanju mogu se navesti:

- nedovoljan stepen usitnjavanja materijala i
- slaba homogenizacija uzorka pred samo skraćivanje.

Uzroci nastajanja sistematskih grešaka mogu biti:

- kontaminacija uzoraka drugim, prethodno obrađivanim, materijalom;
- nepravilna šema skraćivanja, i neodgovarajuće sušenje uzorka, kao i gubitak preusitnjenih čestica minerala.

U procesu skraćivanja uzoraka moraju se unapred poznavati i sprovesti određene mere, da bi se sprečile mogućnosti nastajanja ovih grešaka. U tom smislu posebnu pažnju treba posvetiti:

- radna mesta da budu potpuno čista i uredna. Isto se zahteva i od osnovnog i pomoćnog pribora, uređaja, instrumenata i posuda;
- pojedinačna i odvojena obrada različitih uzoraka na određenim mestima;
- tačno se pridržavati šeme i pravila skraćivanja uzoraka;
- posude i instrumente (kofe, pehare, lopatice, levkovi, mešalice) rezervisati za uzorke istih vrsta (čime se mogućnost kontaminacije u mnogome smanjuje).

1.7 LITERATURA

1. Al'bov, M. N., 1975: Oprobovanje mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh. - Nedra, Moskva.
2. Allman, M., Lawrence, F.D., 1981: Geological Laboratory Techniques; Arco Publishing Company, INC., New York.
3. Bogackii, V.V., 1963: Matematicheskii analiz razvedochnoi seti. - Geosgeoltekhizdat, Moskva.
4. Boyarskii, A. Ya., 1977: Obshchaya teoriya statistiki. - Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, Moskva.
5. Gy, P. M., 1982: Sampling of Particulate Materials. - Elsevier, Amsterdam.
6. Janković, S., 1957: Oprobavanje i proračun rezervi mineralnih sirovina. - Zavod za geološka i geofizička istraživanja Srbije, Beograd.
7. Janković, S., 1981: Ležišta mineralnih sirovina - geneza rudnih ležišta. - Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
8. Kazhdan, A. B., 1977: Razvedka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh. - Nedra, Moskva.
9. Khan, G. A., 1979: Oprobovanje i kontrol' tekhnologicheskikh protsesov obogashcheniya. - Nedra, Moskva.
10. Kozak, J., Cagaš, Z., 1965: Hodnoceni upravitelnosti a zpusobu upravy nerostnykh surovin. - SNTL/SVTL, Praha.
11. Krasnov, D. A., 1969: Teoreticheskie osnovy i raschetnye formuly opredeleniya vesa proby. - Nedra, Moskva.
12. Krumbein, W. C., & Graybill, F. A., 1965: An introduction to statistical models in geology. - McGraw-Hill Book Company, New York.
13. Kulikov, A. A., Kulikova A.B., 1988: Tekhniko-metodicheskie osnovy oprobovaniiia gornyykh porod na zoloto. - Nauka, Moskva.
14. Lukač, J., 1993: Fyzikalne metody rozdružovania. - Banicka fakulta, Košice.
15. Magdalinović, N., 1991: Usitnjavanje i klasiranje mineralnih sirovina. - Naučna knjiga, Beograd.
16. Mitrofanov, S. I., Barskii, L. A., Samygin, V. D., 1974: Issledovanie poleznykh iskopaemykh na obogatimot'. - Nedra, Moskva.
17. Ogloblin, N. D., Mrushlevich, I. V., 1958: Tehnicheskii kontrol' na ugleobogatitel'nykh fabrikakh. - Ugletekhizdat, Moskva.
18. Pogrebetskii, E. O., Paradeev, S.V., Porotov, G. S., 1977: Poiski i razvedka mestopozhdenii poleznykh iskopaemykh. - Nedra, Moskva.
19. Ramdohr, P., 1960: Die Erzminerale und ihre Verwachsungen. - Akad. Verlag, Berlin.
20. Sagrađyan, A. L., Suvorovskaya, N. A., & Krangachev, B. G., 1983: Kontrol' tekhnologicheskogo prothessa flotathionnykh fabrik. - Nedra, Moskva.
21. Schneiderhohn, H., 1952: Erzmikroskopisches Praktikum. - Stuttgart.
22. SME Mineral processing handbook. 1985: - Published by Society of Mining Engineers, New York.
23. Smirnov, V. I., 1976: Geologija poleznykh iskopaemykh. - Nedra, Moskva.
24. Spravochnik po obogashcheniyu rud I II III. 1974. - Nedra, Moskva.
25. Spravochnik po obogashcheniyu rud. 1983. - Nedra, Moskva.
26. Woodcock C. R., & Mason J.S., 1996: Bulk solids handling. - Blackie academic & professional, London.
27. Zelenov, V. I., 1978: Metodika issledovaniiia zoloto-soderzhashchikh rud, Nedra, Moskva.

nec
adi-
uće
sti-
ma-
re-
islu
se
aja,
na
zo-
ev-
či-
na-

SADRŽAJ GLAVE 2

2.1 VLAGA U MINERALNOJ SIROVINI	49
2.1.1 Voda u mineralima.....	49
2.1.2 Uzorkovanje na vlažnost.....	50
2.1.3 Odstranjivanje vlage iz sirovina.....	50
2.1.4 Vrste vlage u sirovini	51
2.1.5 Značaj određivanja vlage	51
2.2 LITERATURA	52

k

U:
ci
oc
pi
ci
na
sr

2

N
k
n
v

p
s
te
f

c
r
i
k
c
s
v
z
l
c
l

:

1

GLAVA 2

2.1 VLAGA U MINERALNOJ SIROVINI

Uzorkovanje mineralne sirovine ili proizvoda PMS sa ciljem određivanja njihove vlažnosti predstavlja jedan od vrlo važnih zadataka koji se sprovode u idustrijskom procesu. Da bi smo ustanovili određenu vlažnost, u specijalno za tu svrhu izdvojenim uzorcima, neophodno je najpre ustanoviti sve vidove vode u mineralima odnosno mineralnoj sirovini.

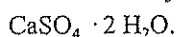
2.1.1 VODA U MINERALIMA

Neki minerali u svom sastavu imaju vodu i ona se prikazuje u hemijskoj formuli na razne načine. Voda u mineralima može biti različitog porekla. Kada govorimo o vodi u mineralima razlikujemo sledeće slučajeve:

① mehanički uklopljena voda, koja je obično uklopljena u mineral još u fazi njegovog stvaranja. Iz njega se može odstraniti tek zagrevanjem do vrlo visokih temperatura. Ovakva voda ne prikazuje se hemijskom formulom, jer predstavlja strano telo u mineralu;

② higroskopna voda (vlaga ili kapilarna voda), je ona voda koju mineral apsorbuje iz vazduha. Iz minerala se može lako odstraniti zagrevanjem na oko 105°C i takođe ne ulazi u hemijsku formulu minerala. Njena količina nije stalna pa čak postoji izvestan afinitet pojedinih mineralnih vrsta prema apsorpciji vode iz vazduha dok druge mineralne vrste taj afinitet ili nemaju ili je sveden na minimalne vrednosti. Količina higroskopne vode u jednom istom mineralu zavisna je od veličine zrna minerala: sa smanjenjem njihove veličine količina higroskopne vode raste. Vezana isključivo za površine čestica. Primer minerala sa dosta higroskopne vode su minerali glina, fosfati, ugalj, halit i dr.;

③ kristalna (kristalizaciona) voda u mineralima vezuje se u vreme kristalizacije odnosno formiranja minerala. Njena količina u mineralnim vrstama strogo je definisana: mineral gips, na primer, ima dva molekula kristalne vode te njegova formula glasi



Zagrevanjem do određene temperature deo vode se gubi i mineral prelazi u poluhidrat, odnosno ova voda se može potpuno odstraniti iz minerala s tim da on pri tome menja i fizička svojstva i najčešće se raspada. Izgublenu vodu mineral može katkad ponovo da primi. Pri tom treba napomenuti da je kristalna voda u rešetki minerala raspoređena pravilno ali da nije čvrsto vezana. Kao primer mogu se navesti i minerali:

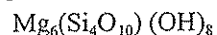
hrizokola $\text{CuSiO}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ ($\text{H}_2\text{O} \approx 20\%$)
halkantit $\text{Cu}(\text{SO}_4) \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ koji ima 36,1% vode a
odsrtanjuje se dehidracijom do 400°C.

Interesantni su u tom pogledu i minerali bora:

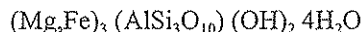
Kernit $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$
Uleksit $\text{NaCaB}_5\text{O}_7 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$
Boraks-Tinkal $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$
Kolemanit $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$
Hidroboračit $\text{CaMgB}_6\text{O}_{11} \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$
Pandermit $\text{Ca}_4\text{B}_{10}\text{O}_{13} \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$
Injoit $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 13 \text{H}_2\text{O}$

④ koloidna voda, javlja se kod hidrogela kojima se na površini čestica drži veoma slabim vezama koje se lako odstranjuju već isušivanjem. Količina ove vode, za razliku od kristalne, nije strogo definisana za određenu mineralnu vrstu i stoga se u formuli minerala označava kao $n \text{H}_2\text{O}$, kao na primer kod minerala limonita, opala (koji sadrži 13-20% vode a koja se dehidracijom može ukloniti do 250°C) i dr.;

⑤ konstitucionalna voda je deo strukture minerala. Hidro jedinjenja koja sadrže ovakvu vodu zapravo je imaju u kristalnoj rešetki kao, vrlo često, vezanu hidroksidnu grupu (OH). Ovakva voda ne može se odstraniti jer se njenim odstranjivanjem ruši kristalna rešetka. Jednom odstranjena konstitucionalna voda ne može se primiti nazad. Postoje mineralne vrste koje imaju i kristalnu i konstitucionu vodu. Primer za ovakav slučaj je mineral serpentin



koji sadrži 12,9 % H_2O ili mineral vermikulit



koji sadrži 10 % H_2O . Molekularna voda počinje da se gubi pri 200-300° C, a hidroksilna voda pri 800-950° C a razgrađuje na 900-1000° C. Zatim tu je mineral brucit $\text{Mg}(\text{OH})_2$ i drugi.

⑥ **zeolitska voda**, nazvana je tako po mineralima zeolitima u kojima se javlja. Ima veom specifičan način pojavljivanja u rešetki minerala. Nije ravnomerno raspoređena već zauzima prsline i kanale u strukturi. Lako se odstranjuje iz minerala (u vrlo širokom temperaturnom intervalu od 80-400° C), pri čemu se jedan deo može vratiti bez razaranja kristalne rešetke. Deo zeolitske vode takođe može biti zamenjen drugim gasovitim materijama kao što su amonijak, ugljovodonik i dr.

2.1.2 UZORKOVANJE NA VLAŽNOST

Vlaga, koja se nalazi u mineralnim sirovinama, može biti, prema svom karakteru, podeljena u tri grupe:

- **Konstitucionalna i kristalizacionalna vlaga**, vezana hemijski sa materijom u kojoj se nalazi; ona se može odstraniti na temperaturama od 300-1300°C i predstavlja deo unutrašnje vode.

- **Higroskopna i kapilarna vlaga**, čiji sadržaj u materijalu zavisi od prisustva manje ili veće količine vode, odnosno pare u njemu i od relativne vlažnosti vazduha koji ga okružuje.

- **Spoljna ili gravitaciona (gruba, utovarna) vlaga**, obično obavlja i prekriva tankim slojem komade ili čestice mineralne sirovine; čuvanjem materijala na suvom i toplom (laboratorija sa 20°C i 50% vlažnosti vazduha) ona se postepeno cedi i gubi isparavanjem dok materijal ne pređe u vazdušno-suvo stanje, koje se karakteriše prisustvom u materiji samo kristalizacione i hidroskopske vlage.

Postoji i podela vlage, odnosno vode u sirovini na:

- **Slobodna voda** (površinska, kapilarana i higroskopna)

- **Unutrašnja voda** (hemijski vezana voda, konstitucionalna i kristalizacionalna voda).

U zavisnosti od sadržaja vlage proizvodi pripreme mineralnih sirovina se dele na:

- **žitke**, (u tečnom stanju, pulpe), koji sadrže više od 40% vlage;
- **mokre**, koji sadrže 15-40% vlage (vlaga se, iz sitnozrnih materijala, oslobađa tokom dužeg stajanja, transporta, pretovara). Kod materijala u žitkom stanju - kao pulpa i mokrom stanju karakteristično je prisustvo "spoljašnje vode" ili slobodne vode u svim vidovima;
- **vlažne**, koji su na prelazu od mokrih ka vazdušno-suvim, sa sadržajem vlage 5-6 do 15-20% u vidu hidroskopske, kapilarne i zarobljene vode;
- **vazdušno-suve**, predstavljaju zrnasti, rastresiti materijal čija površina može biti neznatno ovlažena vodenom parom usled njegove higroskopičnosti. Inače sirovina koja je vazdušno-suva sadrži par procenata vlage;
- **suve proizvode PMS ili sama sirovina ne sadrže "spoljašnje vode"**.

U mnogim slučajevima za određivanje vlage koristi se uzorke izdvojene istim postupcima kao za hemijsku analizu.

Posebno je važno, da se uzorci na kojima se određuje vlažnost, izdvajaju u relativno kratkom vremenu i moraju se čuvati u hermetički zarvorenim posudama. Uzorci moraju biti izdvojeni u momentu merenja samih proizvoda jer u protivnom slučaju zbog isparavanja i gubitka vlage (posebno zbog transporta u otvorenim sudovima) masa suvog proizvoda, dobijena računski, neće odgovarati realnoj vrednosti mase suvog proizvoda koja se izračunava kao razlika mase uzorka određene merenjem i količine vlage dobijene prema podacima analize.

Uzorci na vlažnost se takođe izdvajaju vrlo pažljivo i istim metodama kao i uzorci za hemijsku analizu, s tom razlikom, što se izdvojene porcije neposredno mere na licu mesta ili se čuvaju u hermetički zatvorenim posudama i transportuju do laboratorije. Tako se postupa na primer pri izdvajanju srednjeg smenskog uzorka. Pri ovome treba imati u vidu što ponovljeno uzorkovanje na vlažnost retko daje identičan rezultat, naročito u slučajevima kada se uzorkuje krupnokomadasti materijal. Pri brzom isušivanju materijala preporučuje se izdvajanje uzoraka najprostijim i najjednostavnijim načinom, čak i manje tačnom metodom, polazeći od pretpostavke, da će greške, nastale usled netačnosti primenjene metode biti mnogo manje od grešaka, nastalih usled dužeg stajanja uzoraka na vazduhu u toku njegovog uzimanja, nekim tačnijim (preciznijim) metodama.

Jedan od takvih, jednostavnih postupaka uzorkovanja na vlažnost, jeste izdvajanje uzoraka u toku pražnjenja (bunkera, vagona i dr.). Međutim, u primeni ovog načina treba imati u vidu, što usled različitog stepena isparavanja, odnosno gubitka vlage, po različitim slojevima odnosno dubini skladištenog materijala, i sama vlažnost je različita. Naročito će biti značajna razlika u vlažnosti između površinskih i unutrašnjih slojeva. Zbog toga se preporučuje, da kod uzorkovanja na vlažnost, prvi sloj koji je relativno suv bude odstranjen a uzorak se brzo izdvoji iz još uvek vlažnih unutrašnjih partija materijala.

Posebne teškoće mogu da se pojave kod uzorkovanja krupnokomadaste sirovine, jer krupni komadi sadrže manje vlage od sitnozrnih materijala zbog specifične slobodne površine kod krupnih komada sirovine koja je daleko manja nego slobodne površine kod sitnozrnih materijala.

Kod usitnjavanja odnosno drobljenja mineralne sirovine takođe dolazi do "sušenja" pri čemu se količina izgubljene - isparene vode mora biti uzeta u obzir kod izračunavanja vlažnosti polaznog materijala. Promene vlažnosti u toku drobljenja određuju se eksperimentalno. Nadalje, količina vode koja se na ovaj način gubi, dodaje se kasnije kao određeni procenat utvrđene vlažnosti već izdrobljenog materijala ispitivanog uzorka. Po eksperimentalnim podacima, gubitak vlažnosti kod drobljenja može leti iznositi do 10%, dok zimi ovaj gubitak iznosi do 7%.

2.1.3 ODSTRANJIVANJE VLAŽE IZ SIROVINA

Najjednostavniji način odstranjivanja vlage, u osnovi primenljiv za krupno i srednje zrnast materijal, jeste od-

kapavanje odnosno dreniranje (odkapavanje, ceđenje). Vlažnost odvodnjenog krupno- i srednjeznog materijala iznosi 5-10%. Žitka pulpa, sitnozrnog ili fino mlevenog materijala odvodnjava se obično zgušnjivanjem i filtriranjem. Nakon izlaska iz zgušnjivača proizvodi sadrže 40-60% vlage, dok posle filtriranja svega 10-15% (u nekim slučajevima nakon filtriranja vlažnost može biti i 7%).

Nakon odstranjivanja spolašnje vlage iz sirovine (ostaje deo kapilarne, higroskopne) ona se može podvrgnuti sušenju.

2.1.4 VRSTE VLAGE U SIROVINI

□ **Gruba vlaga** (gravitaciona jamska utovarna) otklanja se stajanjem na 20°C i 50% relativne vlažnosti vazduha u laboratorijskim uslovima i trajanju od 24 časa, određuje se na materijalu od 1 kilograma, odnosno do konstantne razlike u promeni mase od 0,5 grama.

□ **Higroskopna voda** - adsorpciona voda u vidu monomolekularnog sloja (sa smanjenjem krupnoće sirovine povećava se i količina ove vode) kao i kapilarna voda u porama i prslinama, obe se uklanjaju na 105-110°C (dva časa u sušnici, 1-2 gr materijala);

□ **Konstituciona voda** (hemijski vezana voda) odstranjuje se u hemijskim laboratorijama na 300-600-700°C (pa čak i 1300°C);

Tako možemo govoriti, kada je reč o čišćenju uglja, ili o proizvodima PMS različitog stepena vlažnosti odnosno sadržaja vlage, primera radi:

• **radno gorivo** - sa ukupnom vlagom (gruba, higroskopna i delom kapilarna),

• **vazdušno suv uglj** - sa higroskopnom i delom kapilarne vode, ali bez jamske,

• **apsolutno suv uglj** - bez ukupne vlage (odstranjena gruba, higroskopna kapilarna).

Gruba vlaga se odstranjuje na laboratorijskoj temperaturi od 20°C, pri relativnoj vlažnosti vazduha 50%. Uzastopna merenja razlika treba da iznose 0,5g/ 1kg ili 0,05%.

$$V_g = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100 \quad (\%)$$

gde su: Q_1 , Q_2 - mase uzorka pre i posle sušenja.

Higroskopna vlaga se određuje na temperaturi 105-110°C u trajanju od dva časa. Masa uzorka (kod ugljeva) iznosi 1-2 g, i sprasjen je do 100% ispod 0,2 mm. Nakon sušenja uzorak se vadi iz sušare, hladi u eksikatoru 15 minuta i meri.

$$V_h = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100 \quad (\%)$$

gde su: Q_1 , Q_2 - mase uzorka pre i posle sušenja, odgovarajuće.

Prema tome možemo reći da ukupnu vlagu u uzorku čini: gruba vlaga (jamska, utovarna) sa higroskopnom i kapilarnom vlagom.

Ukupnu vlagu čini:

$$V_u = V_g + V_h$$

Srednje vrednosti za vlagu, po određenim partijama sirovine ili u pogonu po smenama, određuje se po obrascu:

$$V = \frac{\sum Q_i \cdot V_i}{\sum Q_i}$$

gde su:

Q_i - masa materijala koji se uzorkuje za određivanje vlage, a to može biti ukupna masa prerađene sirovine, ili ukupna masa dobijenog koncentrata za određeni vremenski period (smena, dan, dekada);

V_i - odgovarajući sadržaj vlage u i -tom uzorku.

2.1.5 ZNAČAJ ODREĐIVANJA VLAGE

Sve bilanse metala u PMS određujemo prema masi suve materije (bez ukupne vlage - bezvodne materije) i preko sadržaja komponente koja se analizira (metala, pepela, elementa) u hemijskoj laboratoriji (dobijene na apsolutno suvoj materiji):

$$C_v = \frac{C_s(100 - V_{ukup.})}{100} \quad \text{ili} \quad C_s = \frac{C_v \cdot 100}{100 - V_{ukup.}}$$

gde su:

C_v - sadržaj komponente u vlažnom uzorku;

C_s - sadržaj komponente u suvom uzorku;

$V_{ukup.}$ - ukupna vlaga.

❖ ❖ ❖

❖ **Primer:** poznato je da galenit ima teoretski sadržaj olova 86,40% i sumpora 13,60%; međutim ukoliko čist koncentrat galenita ima 10% vlage, tada je odnos sledeći: ukoliko koncentrat ima 10% vlage ostatak od 90% čini PbS. Prema tome sadržaj Pb u vlažnom koncentratu iznosi $Pb_{(90)} = 86,40 \cdot (100 - 10)/100 = 77,76\%$. Odnosno na svakih 100g PbS sa 10% vlage dolazi 77,76% Pb.

❖ ❖ ❖

❖ **Primer:** ruda bakra uzorkovana na ulazu u industrijski proces sadrži 1,20% bakra s tim da sirovina ima 12,50% vlage. Interesuje nas koliki je sadržaj bakra u suvoj sirovini.

Rešenje: $Cu_{(90)} = 1,20 \cdot (100 - 12,50)/100 = 1,37\%$.

Vlažna sirovina

V=12,50%	Cu=1,20%	Jalovina
----------	----------	----------

Bezvodna sirovina

Cu=1,37%	Jalovina
----------	----------

❖ ❖ ❖

❖ **Primer:** kod analize uzorka vazdušno-suvog uglja (kome je odstranjena gruba vlaga ili tovarna vlaga) dobijeni su sledeći podaci:

analitička vlaga	$V_a = 10,50\%$
pepeo	$p = 5,37\%$
sumpor	$S_a = 0,66\%$

Treba izračunati procentualni sadržaj pepela i sumpora u suvom uglju.

Rešenje: Sadržaj suve materije iznosi $100 - 10,50\% = 89,50\%$. Sadržaj pepela (u %) u suvom uglju (u bezvodnoj materiji) iznosi, prema proporciji ako u (100-10,50) grama suvog uglja ima 5,37 grama pepela; tada u 100 grama suvog uglja ima X grama pepela. Iz toga sledi da

$P_s = (5,37 \cdot 100) / (100 - 10,50) = 6,00\%$ pepela u suvom uglju. Sadržaj sumpora (u %) u suvom uglju iznosi u (100-10,50) grama suvog uglja ima 0,66 grama sumpora; tako isto

u 100 grama suvog uglja ima X grama sumpora. Iz toga sledi

$S_s = (0,66 \cdot 100) / (100 - 10,50) = 0,74\%$ sumpora u suvom uglju.

* Primer: kod analize vazdušno-suvog uzorka uglja (odstranjena gruba, utovarna vlaga) dobijeni su sledeći rezultati:

analitička vlaga $V_a = 1,35\%$

pepeo $P_a = 18,56\%$

volatili $W_a = 22,40\%$

neisparljiva ugljena materija $57,60\%$

Izračunati procentualno učešće (sadržaj u %) komponenata u uzorku ako je vlažnost 12,00 %.

Rešenje: Odredimo sadržaj suve materije u vazdušno - suvom uzorku

$100 - 1,35 = 98,65$ grama ili 98,65%

Odredimo sadržaj suve materije u radnom gorivu

$100 - 12,00 = 88,00$ grama ili 88,00%.

Odredimo sadržaj pepela u radnom gorivu

(100-1,35) grama suvog uzorka sadrži 18,65 grama pepela.

(100-12,00) grama suvog uzorka sadrži X grama pepela.

$P_{r.g.} = (18,65 (100 - 12,00)) / (100 - 1,35) = 16,63\%$

Ukupna vlaga $V_{ukupna} = 12,00\%$

Volatili $W_a = (22,40 (100 - V_{ukupna})) / (100 - V_{ukupna}) = 19,98\%$.

Pepeo radnog goriva $P_{(radno\ gorivo)} = (18,65 (100 - 12,00)) / (100 - 98,65) = 16,63\%$.

$K_{(radno\ gorivo)} = (57,60 (100 - 12,00)) / (100 - 98,65) = 51,39\%$.

2.2 LITERATURA

1. Đorđević, V., Đorđević, P., Milovanović, D., 1991: Osnovi petrologije. – "Nauka", Beograd.

3.1.1

3.1.1

3.1.2

3.1.3

3.1.4

3.1.5

3.1.6

3.1.7

3.1.8

3.1.9

3.1.1

3.2.1

inac
vom
epe-
la.
%.
00))
i.

SADRŽAJ GLAVE 3

3.1 HEMIJSKI SASTAV SIROVINE	57
3.1.1 Analiza uglja	58
3.1.2 Elementarna analiza	58
3.1.3 Tehnička analiza uglja	60
3.1.4 Sadržaj vlage	60
3.1.5 Sadržaj pepela	61
3.1.6 Toplotna moć (energetska vrednost, kalorična vrednost, toplotni efekat) uglja	63
3.1.7 Isparljive materije - volatili	64
3.1.8 Određivanje c_{fix}	64
3.1.9 Određivanje koksa	64
3.1.10 Sumpor u uglju	65
3.2 LITERATURA	65

Odre
prot:
prip:
stav:
upot:
cije.
duje
odre
izvo
sred
ntra:
lošk
vno:
cije.
kuje
sast:

njer:
tom
ulaz
trac
okv
nera
ne.

svih
rku,
dna
(kri
data
lim:

ra:

GLAVA 3

3.1 HEMIJSKI SASTAV SIROVINE

Određivanje hemijskog sastava mineralne sirovine i proizvoda koncentracije igra veliku ulogu u procesima pripreme mineralnih sirovina. Na osnovu hemijskog sastava ocenjuje se kvalitet mineralne sirovine i njena upotrebna vrednost i inicira potreba i uslovi koncentracije. Hemijskim sastavom proizvoda koncentracije određuje se njihov kvalitet i tržišna vrednost. Pored toga određivanje hemijskog sastava ulazne sirovine i proizvoda koncentracije služi kao jedno od nezamenljivih sredstava kontrole u tehnološkim postupcima koncentracije mineralnih sirovina i utvrđivanja efekata tehnološkog procesa. Za određivanje kvalitativno-kvantitativnog sastava mineralne sirovine i proizvoda koncentracije, primenjuje se više vrsta hemijskih analiza. Razlikuje se kompletan hemijski sastav, delimičan hemijski sastav i fazna analiza.

1. Kompletan hemijski sastav, određuje se na srednjem reprezentativnom uzorku mineralne sirovine uzetom po određenim pravilima iz ležišta ili dela ležišta, iz ulazne sirovine u proces PMS ili iz proizvoda koncentracije. Elementi ili jedinjenja koji treba da se odrede u okviru kompletne hemijske analize zavise od vrste mineralne sirovine, odnosno od mineralnog sastava sirovine.

Kompletna hemijska analiza obuhvata određivanje svih sadržanih elemenata i jedinjenja u ispitivanom uzorku, tako da zbir dobijenih rezultata treba da bude jednak 100%, uključujući i gubitak koji nastaje žarenjem (kristalna voda, O_2 , CO_2 i sl.). U sledećem primeru je data kompletna hemijska analiza izvršena na jednoj polimetalnoj rudi.

Primer kompletne hemijske analize jedne rude bakra:

Cu-ukupni	= 1,20 %
Cu-inertni	= 0,40 %
Cu-aktivni	= 0,80 %
Fe	= 8,60 %
S	= 3,50 %

Al_2O_3	= 10,12 %
SiO_2	= 73,34 %
Gub.žar.	= 3,24 %

Primer kompletne hemijske analize jedne Pb-Zn rude:

Pb	= 13,18 %
Zn	= 8,58 %
Fe	= 6,88 %
Sb	= 0,35 %
As	= tragovi
S	= 10,75 %
MnO	= 8,93 %
SiO_2	= 42,02 %
Al_2O_3	= 7,42 %
CaO	= tragovi
MgO	= tragovi
gub.žar.	= 1,89 %

Sabiranjem dobijenih procentualnih sadržaja elemenata i jedinjenja dobija se zbir koji je jednak 100%, što govori da su analizom obuhvaćeni svi sadržani elementi i jedinjenja u analiziranom uzorku rude. Kompletna hemijska analiza daje prvi uvid u sastav i kvalitet sirovine. Ova analiza izvodi se uglavnom na ulaznoj sirovini ili u okviru naučno-istraživačkog rada na uzorcima koji su predmet detaljnih istraživanja, a rede na proizvodima koncentracije.

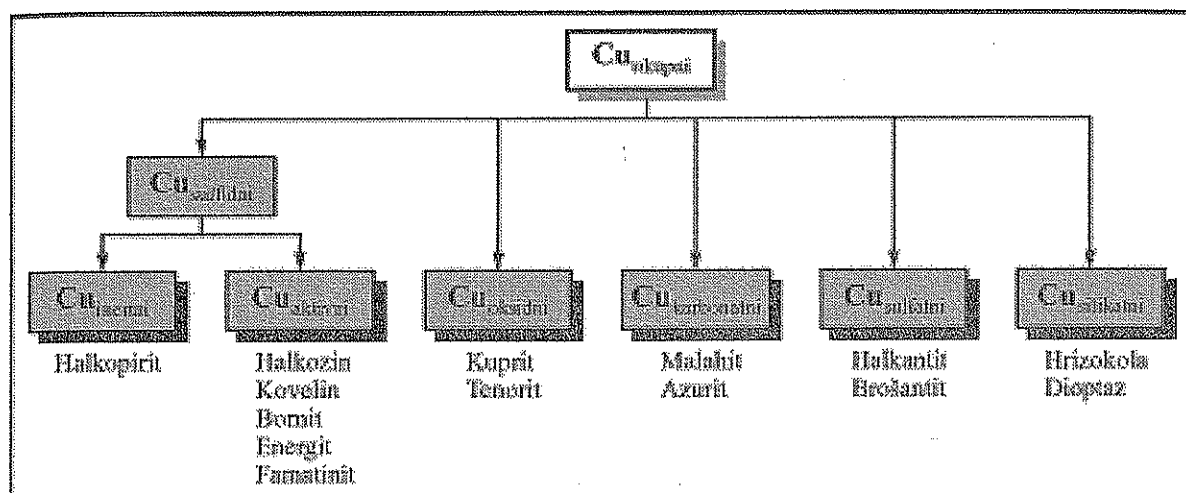
2. Delimičan hemijski sastav, određuje se na uzorcima prikupljenim tokom prospekcije i istraživanja ležišta, eksploatacije sirovine kao i na proizvodima koncentracije kada se izvodi u cilju kontrole tehnološkog procesa ili u okviru laboratorijskih istraživanja i dr. Delimičan hemijski sastav obuhvata određivanje samo pojedinih elemenata ili jedinjenja i to uglavnom korisnih i štetnih. Na primer: po izvršenoj flotacijskoj koncentraciji na olovno-cinkovo-bakamoj rudi određuje se procentualni sadržaj Pb, Zn i Cu na dobijenim proizvodima koncentracije; po izvršenom raslojavanju uglja u teškim tečnostima, određuje se sadržaj ukupnog pepela u dobijenim frakcijama uglja itd.

P.
d.

F

F
A

S
D
E
I
I



Sl.3.1 Ilustracija fazne analize ukupnog bakra u uzorku

Primer delimičnog hemijskog sastava uzorka rude gvožđa:

Fe (ukupno)	= 35,00 %
Fe (rastvorljivo)	= 30,00 %
Fe (nerastvorljivo)	= 5,00 %
S	= 0,60 %
P	= 0,00 %
SiO ₂	= 18,20 %
Pb	= tragovi
Zn	= tragovi

Primer delimičnog hemijskog sastava ulazne sirovine:

Pb ukupno	= 1,60 %
Pb oksidno	= 0,40 %
Zn ukupno	= 3,20 %
Fe ukupno	= 31,91 %
S ukupno	= 14,00 %

Primer delimičnog hemijskog sastava koncentrata olova, dobijenog iz olovo-cinkove rude:

Pb	= 72,46 %
Zn	= 0,82 %
Cu	= 2,40 %

3. Fazna hemijska analiza zasniva se na razlici u rastvaranju minerala ili grupe minerala dejstvom određenih rastvarača. Ilustracija fazne analize na primeru minerala rude bakra data je na slici 3.1. Tom prilikom mineral se prevodi u rastvor i isti se dalje analizira. Rastvorljivost zavisi od prirode minerala i rastvarača a sa povećanjem temperature raste i rastvorljivost minerala. Hemijsko razlaganje je veoma uspešno u slučajevima obrazovanja gasovite faze i lako rastvornih soli metala (hlorida, sulfata itd.), nasuprot teško rastvorljivim solima koje se dobijaju u vidu čvrste faze ili ostatka. Za uspešno izvođenje ove analize potrebna je određena stručnost i poznavanje približnog mineralnog sastava sirovine (svi karbonati se izuzev karbonata olova rastvaraju u hlorovodoničnoj kiselini; arsenidi, antimonidi, selenidi i teluridi rastvaraju se u azotnoj kiselini; hloridi alkalnih i zemnoalkalnih metala u sumpornoj kiselini i td.).

3.1.1 ANALIZA UGLJA

Ugalj kao fosilni ostatak biljaka, sastoji se pretežno od ugljenika, a pored njega vodonika, azota i kiseonika.

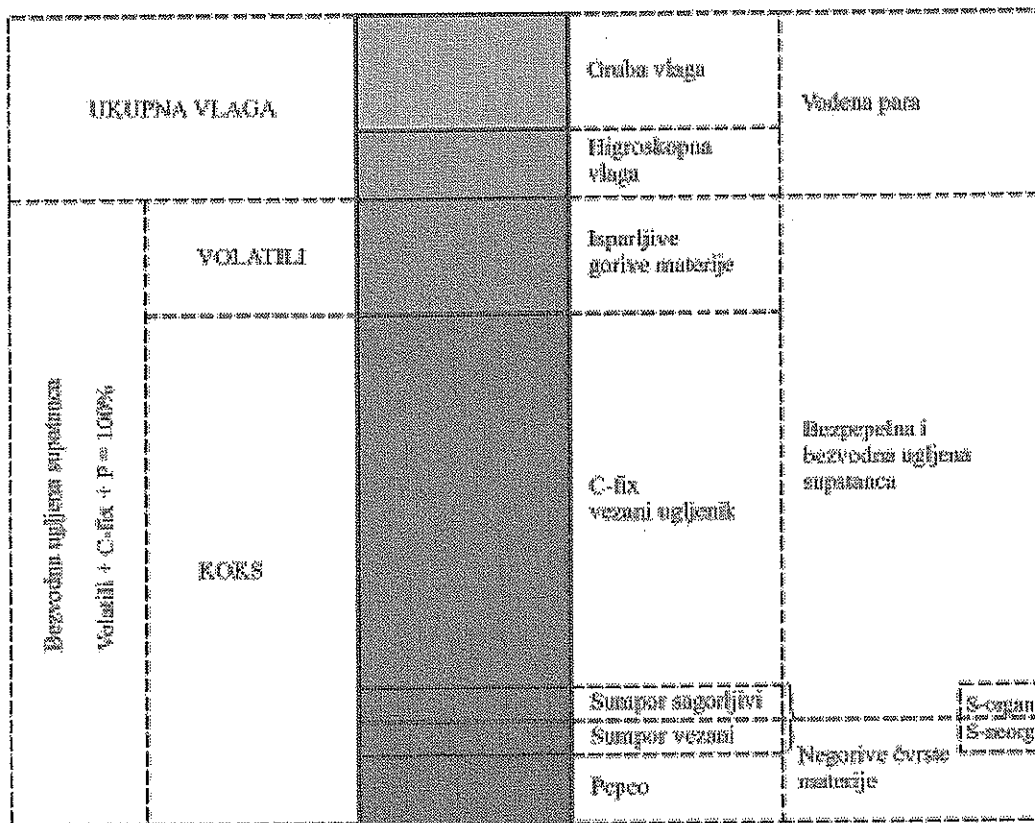
Sumpor se nalazi u uglju kao sulfid (piritni ili markasitni) ili kao organski (sumpor sjedinjen sa ugljenikom) odnosno sulfatni (gvoždev ili kalcijumov sulfat). Mineralne primese u uglju (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, itd.) zaostaju posle sagorevanja u obliku pepela, pa su obuhvaćene zajedničkim imenom pepeo. Od navedenih elemenata sagorevaju C, H i S (osim sulfatnog) dok kiseonik i azot ne gore. Zavisno od geološke starosti razlikuju se: treset, mrki i kameni ugalj i antracit. Mlađi mrki ugalj se zove lignit, a stariji smolni ugalj. Kamenji ugalj dele se prema količini isparljivih materija na: plamene, gasno-plamene, gasne, masne, posne i antracitne. Za ocenu kvaliteta ugljeva i njihove upotrebljivosti koristi se tzv. tehnička analiza, koja je znatno brža i jednostavnija od elementarne analize (Sl.3.3). Rovni ugalj koji se dobija otkopavanjem iz ležišta sastoji se iz organske mase - gorućeg dela i neorganskih materija (balasta) - vlage i mineralnih primesa. Određivanjem svojstava i hemijskog sastava uglja ukazuje se na njegove energetske i tehnološke karakteristike.

Tehnička analiza obuhvata: određivanje vlage, pepela, sumpora, koksa i energetske vrednosti (toplotne vrednosti, toplote sagorevanja). Iz ovih rezultata izračunavaju se sagorljive materije, nevezani ugljenik (C-fix) i isparljive materije. (Sl.3.2)

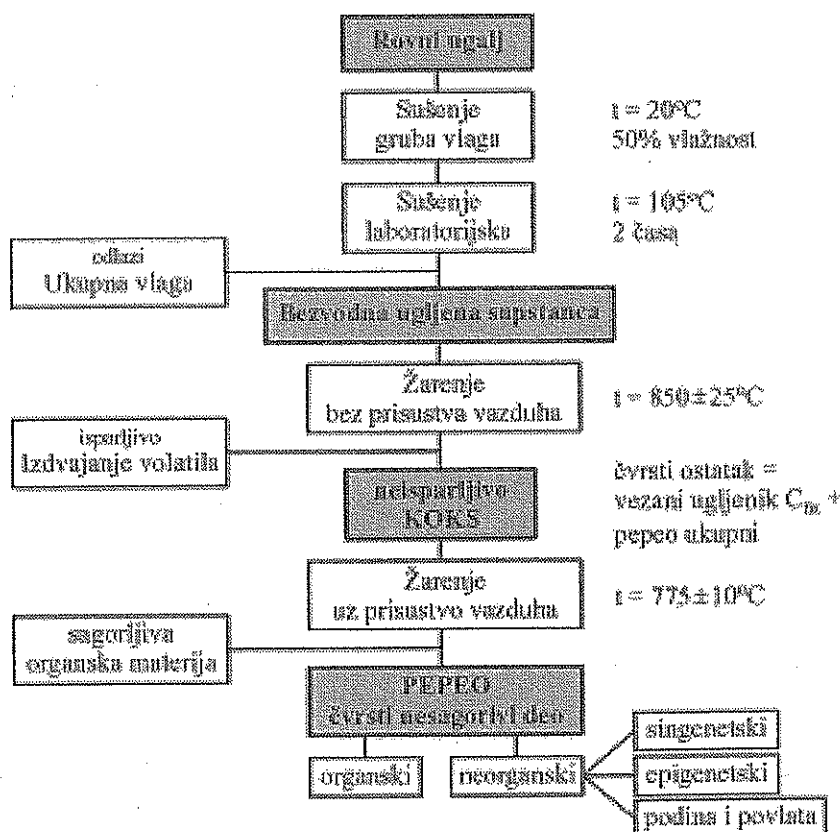
Elementarna analiza ima zadatak određivanje hemijskog sastava organskog (sagorljivog) dela rovnog uglja.

3.1.2 ELEMENTARNA ANALIZA

Elementarna analiza uglja određuje sadržaj C, H, O, N, S_{org} i P. Sadržaj navedenih elemenata određuje se na čistu ugljenu supstancu (sastav organske materije) iz koje je izdvojena ukupna vlaga (nakon sušenja na 105° C) ili na bezvodnu i bezpepelnu ugljenu supstancu. Ova analiza daje samo podatke o procentualnom učešću navedenih elemenata koji čine organsku materiju uglja a ne daje podatke o komplikovanim hemijskim vezama koje čine ovu materiju. Upoređujući podatke o sastavu raznih vrsta uglja možemo utvrditi da se sa sve većim stepenom karbonifikacije uglja povećava sadržaj fiksnog ugljenika a smanjuje se sadržaj isparljivih sastojaka te sa tim i sadržaj vodonika i kiseonika. Podaci o prosečnim vrednostima elementarne analize za različite vrste uglja navedeni su u tablici 3.1. Ovi podaci se odnose na organsku supstancu bez vlage i pepela.



SI.3.2 Sastav jednog rovnog uglja.

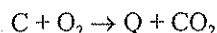


SI.3.3 Analiza rovnog uglja.

Tablica 3.1 Podaci elementarne analize za čistu ugljenu supstancu bez vlage i pepela.

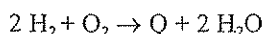
Vrsta uglja	Basen, zemlja	Elementarna analiza			
		C	H	S _{sagorjivo}	O+N
Antracit	Rur, Nemačka	91-92	3,6-4,1	0,7-1,1	3,1-4,2
Kameni ugalj	Rur, Nemačka	82-87	5,2-5,6	0,8-1,2	6,2-11,8
Mrki ugalj	Fohnsdorf, Austrija	73,3	5,5	0,7	20,5
Mrki ugalj	Trbovlje, Slovenija	70,0	4,4	2,5	23,1
Lignit	Kreka, Bosna	67,0	5,0	1,0	27,0
Lignit	Kosovo, Jugoslavija	68,6	5,0	0,4	26,0
Lignit	Lauchhammer, Nemačka	68,0	5,0	0,5	27,0
Lignit	Valdano, Italija	63,8	5,4	1,2	29,6

Ugljenik je osnovna komponenta u sastavu organske mase i glavni nosilac toplotne moći uglja. Sagorevanjem razvija toplotu 34106 kJ/kg. Sadržaj ugljenika raste sa starošću uglja: u mrkim ugljevima sadržaj ugljenika je između 50 i 75 %, u kamenim između 75 i 90 % i u antracitima od 92 do 97 %. Prilikom sagorevanja ugljenik se vezuje za kiseonik i razvija se toplota i gasovi koji odlaze zajedno sa dimnim gasovima.



Tako imamo da 1 kg ugljenika sagorevanjem razvija 34 094 J. Ugljenik se u uglju javlja dvojako: kao isparljivi, koji se prilikom sagorevanja uglja jedini sa kiseonikom iz vazduha, gradeći gasove CO i CO₂ i kao fiksni ugljenik (C_{fix}) koji se iz uglja oslobađa sa gasovitim materijama, gradeći dim i čađ.

Vodonik je drugi koristan element uglja. Sagorevanjem čistog vodonika, razvija se toplota koja je oko četiri puta veća od toplotnog efekta ugljenika. Sagorevanjem jednog kilograma vodonika razvija se toplota od 143298 J. Međutim, stvarna korist vodonikovog prisustva u uglju je mala i smatra se da ukoliko ga ima više, kalorična moć uglja opada. Ovo zbog toga, što veći deo vodonika sa kiseonikom gradi vodu, za čije se isparavanje troši toplota. Jedan manji deo vodonika gradi ugljovodonična jedinjenja - slobodan vodonik i sagorevanjem uglja razvija toplotu. Prilikom sagorevanja, kao što je rečeno, vodonik se vezuje za kiseonik iz vazduha odajući toplotu, prema jednačini:



Veći deo vodonika se u ugljevima javlja i u vidu vode, tako da se pri sagorevanju obrazuje vodena para, a jedan deo vodonika odlazi sa dimnim gasovima. Humusni ugljevi sadrže vodonika između 0,8 i 6,5 %; sapropelni ugljevi od 7,2 do 11,3 %; liptobioliti od 6,0 do 9,2 % i zapaljivi škriljci od 6,5 do 9,8 %.

Sumpor Jedan deo sumpora u uglju je vezan za organsku materiju te ga nazivamo *organski sumpor* a drugi deo je vezan za mineralne sastojke te ga nazivamo *mineralni sumpor*. Ovaj poslednji se pojavljuje u obliku piritu i markasita kao sulfidni sumpor često u obliku zlatnožutih kristala. Ređe se pojavljuje kao sulfat kalcijuma i magnezijuma. Pri hemijskoj analizi sumpor se deli na sagorljivi (isparljivi) sumpor i nesagorljivi u pepelu.

Sagorljivi sumpor sastavljen je iz organskog sumpora i sulfidnog sumpora, ali ukupna količina ovog sumpora u uglju ne prelazi u sagorljivi sumpor već jedan manji deo ostaje u pepelu kao nesagorljivi jer se predhodno pretvori u kalcijum sulfat (CaSO₄).

Organski i sulfidni sumpor prilikom sagorevanja uglja jedine se sa kiseonikom, gradeći gasovite produkte koji korozionu deluju na metalna postorovanja. Sulfatni sumpor nakon sagorevanja uglja ostaje u pepelu. Zbog toga je njegovo prisustvo posebno štetno u ugljevima koji se koriste za dobijanje koksa, jer sumpor iz koksa prelazi u sirovo gvožđe. Kako se koksuju uglavnim kameni ugljevi, to postoji i podela prema sadržaju sumpora:

- niskosumporni 0,5 - 1,5 %
- srednjesumporni 1,6 - 2,5 %
- sumporni 2,6 - 4,0 %
- visokosumporni preko 4,0 %

(Kada je procenat sumpora vrlo visok u kamenim ugljevima (obično iznosi 1%) a znajući da veći deo sumpora potiče iz neorganskih primesa kao što su pirit, markasit i pirotin, onda se preporučuje flotiranje kamenog uglja, kako bi se sulfidi odbacili u jalovinu ili se flotiraju sami sulfidni minerali i odstranili iz uglja.)

Ligniti u našoj zemlji imaju pretežno nizak sadržaj sumpora sa izuzetkom lignita iz Kostolca.

Kiseonik se ubraja u balastne komponente uglja. Mrki ugljevi sadrže kiseonika od 17 do 32 %, kameni od 1,0 do 15,7 %, poluantraciti i antraciti od 0,2 do 1,8%.

Azot se javlja u uglju u relativno malim količinama. Sadržaj azota u humusnim ugljevima u proseku od 1,4 do 2,0 % a u sapropelnim ugljevima liptobiolitima 2,3 do 2,6 %.

Fosfor ulazi u sastav organske mase i mineralnih primesa u uglju. Sadržaj fosfora u ugljevima veoma varira, od desetih do hiljaditih delova procenta. Sagorevanjem uglja fosfor ostaje u pepelu. Fosfor, kao i sumpor su štetne komponente, posebno za ugljeve koji se koriste za dobijanje metalurškog koksa. Prema tome O, S, N, P, su balastne materije uglja (štetne komponente). Elementarna analiza daje približan uvid u starost i kvalitet uglja.

3.1.3 TEHNIČKA ANALIZA UGLJA

Tehnička analiza uglja obuhvata određivanje sadržaja vlage, pepela, isparljivih materija - volatila, sadržaj i osobine čvrstog ostatka - koksa, ukupni sadržaj sumpora i toplotu sagorevanja Q_g i Q_d.

3.1.4 SADRŽAJ VLAKE

Vlaga u uglju povećava nesagorljivi deo te se zato smanjuje toplotni efekat uglja. Ona povećava i zapreminu dimnih gasova koji se razvijaju kod sagorevanja uglja. Sa povećanjem vlage u uglju snižava se temperatura pri sagorevanju.

Razlikujemo *površinsku* i *unutrašnju vlagu* u uglju. Površinska vlaga nalazi se na površini komada i zrna uglja i u međukapilarama. Unutrašnja vlaga nalazi se u kapilarama različite veličine. Deo vlage čini i higroskopska vlaga. (Ugalj na depou može se osušiti samo do higroskopskog sadržaja vlage koja odgovara prosečnoj relativnoj vlazi u vazduhu. Voda iz površinske vlage uglja prouzrokuje smrzavanje sitnih sortimana uglja u veće komade kod mrazeva. Higroskopska voda ne smrzava.) Količina vlage zavisi od: starosti uglja, vlažnosti i temperature vazduha, pritiska, dužine ležanja na skladištu i drugih činilaca. Zavisno od ovih činilaca količina vlage se menja u vrlo širokim granicama. Sadržaj ukupne vlage dostiže u tresetu 90 %, u mrkim ugljevima do 60 %, kamenim ugljevima i antracitu 3 do 15 %. Svojom prisutvom u gorivu vlaga smanjuje procentni sadržaj ugljenika i vodonika, a pored toga troši za njeno isparavanje znatnu količinu toplote. Takođe se prilična količina toplote troši za pregrevanje stvorene pare do temperature dimnih gasova.

Voda se u gorivu javlja kao gruba, higroskopna i konstitucionalna vlaga. Gruba vlaga (jamska vlaga) čini deo ukupne vlage koji se izdvaja iz uglja prirodnim isparavanjem - sušenjem, na vazduhu. Higroskopna vlaga je onaj deo vlage koju ugalj, osušen na vazduhu gubi pri daljem sušenju na 105° C. Utovarna vlaga je ukupna vlaga koju ugalj ima pri utovaru, a sačinjavaju je gruba i higroskopna vlaga. Konstitucionalna voda se ne nalazi u uglju kao voda, već se stvara pri zagrevanju. Ona postaje raspadanjem mineralnih ili organskih materija na višim temperaturama.

Gruba vlaga se određuje iz jednog kilograma uzorka koji se suši na limenoj tacni. Sušenje s vrši do stalne mase u prostoriji čija temperatura iznosi 20° C a relativna vlažnost vazduha 50%. Merenje se vri posle 24 časa sušenja, sve dok razlika između dva uzastopna merenja ne bude manja od 0,5 g.

Higroskopna vlaga se određuje na materijalu koji je osušen u laboratoriji. Odmeri se 1 g uzorka čija je krupnoća 100 % ispod 0,1 mm i suši u sušari 90 minuta na 105° C. Nakon hlađenja vrši se merenje do konstantne mase.

3.1.5 SADRŽAJ PEPELA

Mineralni sastojci u uglju sačinjavaju pepeo. Mineralni sastojci koji sačinjavaju pepeo u uglju su različitog izvora. Jedan manji deo već je bio sadržan u samim biljkama iz kojih je ugalj nastao. Drugi deo je bio donešen u sloju uglja prilikom njegovog stvaranja i treći deo mineralnih sastojaka je naknadno dospeo u sloj uglja. Mineralni sastojci mogu biti fino raspoređeni u ugljenoj supstanci ili se mogu nalaziti u obliku sočiva, slojeva i proslojaka različite moćnosti.

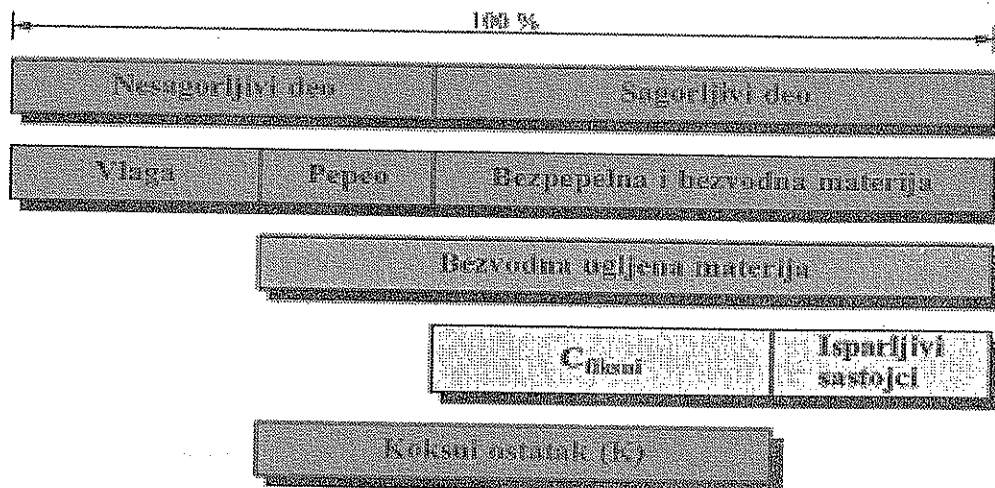
Sve vrste pepela možemo podeliti u dve osnovne grupe: organski i neorganski.

Organski pepeo se još naziva i konstitucionim pepelom i predstavlja ostatak koji se dobija sagorevanjem organskog (gorućeg) dela rovnog uglja. U sastav ovog pepela ulaze alkalni i zemnoalkalni elementi kao što su K, Na, Ca, Mg, Fe, N i td., koji se rastvaraju u vodi. Veličina sadržaja organskog pepela je stalna za jedan isti ugalj i kreće se u proseku od 0,2 do 8,0 %. Istovremeno, organski pepeo predstavlja donju granicu sadržaja pepela u rovnom uglju, odnosno teoretski mogući sadržaj pepela u proizvodima koji se dobijaju mehaničkim postupcima separacije uglja.

Neorganski pepeo potiče od mineralnih primesa sadržanih u rovnom uglju, koje mogu da budu različitog porekla: singenetski, epigenetski i slučajni iz podine i povlate ugljenog sloja.

Singenetski mineralni uklopoci nastali su za vreme akumulacije biljnog materijala u bazenu i u stadijumu dijageneze treseta. To su uglavnom konkrecije, agregati, bubrežaste i loptaste forme kvarca, opala, pirita, markasita, limonita, siderita, krečnjaka, dolomita, liskuna, gline i dr.

Epigenetski mineralni uklopoci nastali su posle formiranja ugljenog sloja, odnosno posle dijageneze i metamorfizma, izlučivanjem minerala uprsline i međusobne prostore ugljenog sloja. Epigenetske mineralne tvorevine su dakle izrazito infiltracionog karaktera. Minerali se u uglju javljaju u formi prevlaka, tankih žilica i proslojaka, a čine ih kalcit, pirit, markasit, siderit, kaolin, kvarc i dr.



Sl.3.4 Tehnička analiza uglja sa odnosima između pojedinih elemenata

Slučajni mineralni uklopoci i stenske mase koje nalazimo u rovnom uglju dospevaju u samu sirovinu prilikom njenog otkopavanja a potiču iz povlate i podine ugljenog sloja. Podinu ugljenih slojeva uglavnom grade gline, glinci i peskovita glina, rede peščari i krečnjaci, a povlatu gline, peščari i krečnjaci.

U literaturi postoji i druga podela pepela prema poretku, a prema kojoj ukupni pepeo svrstavamo u dve grupe: *unutrašnji* i *spoljašnji*.

Unutrašnji pepeo čini organski pepeo i pepeo koji potiče od singenetskih mineralnih primesa. Veličina sadržaja ovog pepela dostiže nekoliko procenata. Mineralne primese koje ulaze u sastav unutrašnjeg pepela uglavnom se ne uklanjaju iz uglja u procesu separacije odnosno pripreme uglja.

Spoljašnji pepeo čini pepeo koji potiče od epigenejskih mineralnih primesa i stena koje čine povlatu i podinu ugljenog sloja. Sadržaj ovog pepela varira u zavisnosti od primenjene metode otkopavanja uglja i delimično od čvrstine podine i povlate ugljenog sloja. Mineralne primese koje čine spoljašnji pepeo, relativno se uspešno uklanjaju iz uglja u procesu separacije.

Pepeo predstavlja čvrsti nesagorivi ostatak koji ostaje nakon žarenja uglja. Tom prilikom dolazi do pune oksidacije i termičkog preobražaja mineralnih komponenta sadržanih u uglju - gubitak kristalne i konstitucione vode iz škriljastih materija, gubitak ugljen dioksida iz karbonata i oksidacije pirinog gvožđa u oksid gvožđa. S toga je metoda određivanja sadržaja pepela u uglju empirijska, jer uslovi sagorevanja određuju veličinu reakcije koja se tom prilikom odvija. Shodno ovome, ostatak dobijen posle žarenja uglja redovno je manji od sadržaja mineralnih materija u ispitivanom uzorku uglja, pa prema tome i pojmovi "mineralne komponente" i "pepeo" nisu istovetni, kao i pojmovi "organska" i "goruća" masa.

Podatke o sadržaju pepela u uglju često iskazujemo na suhu ugljenu supstancu bez vlage. Sadržaj pepela u raznim vrstama uglja kreće se u širokim granicama. Jedan deo pepela iz rovnog uglja odstranjujemo čišćenjem u mokrim i suvim separacijama.

Sadržaj pepela određuje se žarenjem uglja na temperaturi $800 \pm 25^\circ \text{C}$ u mufolnoj peći. Mufolna peć treba da je takve konstrukcije da obezbedi sledeće uslove rada: postizanje temperature za prvih trideset minuta do 500°C , za daljih 60 minuta $800 \pm 25^\circ \text{C}$ i mogućnost održavanja ove temperature do kraja izvođenja analize. Provetranje peći da je obezbeđeno tako, da se za jedan minut najmanje četiri puta izmeni atmosfera. Zdelica za žarenje uglja može da bude od porcelana ili platine, dubine 10-15 mm i veličine da uzorak mase 1 g može da se rasprostire u sloj debljine $0,15 \text{ g/cm}^2$. Zdelica zajedno sa poklopcem se izmeri pre žarenja. Polazni uzorak za ispitivanje sadržaja pepela treba da je mase najmanje 100 g i usitnjen do finoće 100 % ispod 0,2 mm. Nakon sušenja do konstantne mase uz neposredno mešanje izdvaja se srednji uzorak mase 1 g. Masu je potrebno izmeriti sa tačnošću 0,0001 g. Izdvojeni uzorak staviti u zdelicu, poklopiti poklopcem i zajedno meriti, nakon čega se pristupa žarenju. Uslovi žarenja uglja su sledeći: kod određivanja sadržaja pepela u lignitima i mrkim ugljevima za prvih trideset minuta treba dostići temperaturu peći 250°C , a za daljih trideset minuta 500°C a

za poslednjih šezdeset minuta $800 \pm 25^\circ \text{C}$; kod kamenih ugljeva za prvih šezdeset minuta treba dostići temperaturu 500°C a za narednih šezdeset minuta $800 \pm 25^\circ \text{C}$.

Krajnju temperaturu žarenja održavati 60 minuta; to vreme se smatra dovoljnim za ovu analizu. Nakon izvršenog žarenja zdelicu izvaditi zajedno sa poklopcem hladiti 10 minuta, držati u eksikatoru 15 minuta nakon čega vršiti merenje.

Sadržaj pepela u ispitivanom uzorku uglja izračunati prema obrascu:

$$p_a = \frac{M_3 - M_1}{M_2 - M_1} \cdot 100 \quad (\%)$$

gde su:

- p_a - sadržaj pepela u analitičkom uzorku, %
- M_1 - masa zdelice i poklopca (g);
- M_2 - masa zdelice, poklopca i uzorka (g);
- M_3 - masa zdelice, poklopca i pepela (g).

Sadržaj pepela u apsolutno suvom uzorku uglja (po uklanjanju i higroskopne vlage) izračunava se po obrascu:

$$p_s = p_a \cdot \frac{100}{100 - V_a}$$

gde su:

- p_s - sadržaj pepela u apsolutno suvom uzorku (%);
- p_a - sadržaj pepela u analitičkom uzorku (%);
- V_a - sadržaj vlage u analitičkom uzorku (%).

Sadržaj pepela kamenih ugljeva se kreće od 8 do 40%. Kod mrkih ugljeva sadržaj pepela varira od 5 do 25 %, a kod većeg dela lignita od 6 do 25 %, dok jedan deo naših lignita naročito iz donjih delova slojeva u kosovskom basenu ima znatno viši sadržaj pepela koji dostiže i 45 % (sve računato na suhu supstancu).

Postoji i podela ugljeva prema sadržaju pepela na sledeće grupe:

- nisko pepelni, sa sadržajem pepela ispod 10 %
- srednje pepelni, sa sadržajem pepela između 10 i 20 %
- visoko pepelni, sa sadržajem pepela između 20 i 30 %.

Smatra se da je još uvek rentabilna eksploatacija uglja i pri sadržaju pepela 40-45 %, pod uslovom da se u procesu čišćenja - pripreme može ukloniti veći deo jalovine iz uglja.

Tačka topljenja pepela, je jedan od parametara koji takođe ulazi u ocenu kvaliteta uglja. Prema tački topljenja, pepeli se svrstavaju u:

- lako topljivi, sa tačkom topljenja ispod 1200°C
- srednje topljivi, sa tačkom topljenja između 1200 i 1350°C , i
- teško topljivi, sa tačkom topljenja između 1350 i 1500°C .

Ugljevi, kod kojih je tačka topljenja pepela ispod 1200°C , nepogodni su za loženje, jer rastopljeni pepeo zatvara rešetku peći, što otežava sagorevanje uglja, a može da dovede i do gašenja vatre. Ugljevi koji se koriste u gas generatorima treba da imaju tačku topljenja pepela preko 1350°C .

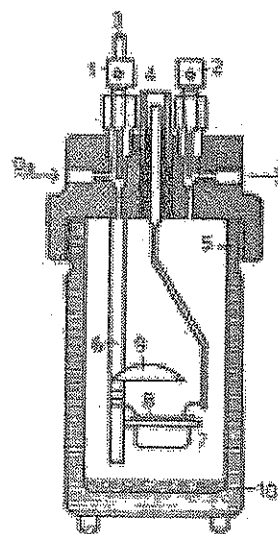
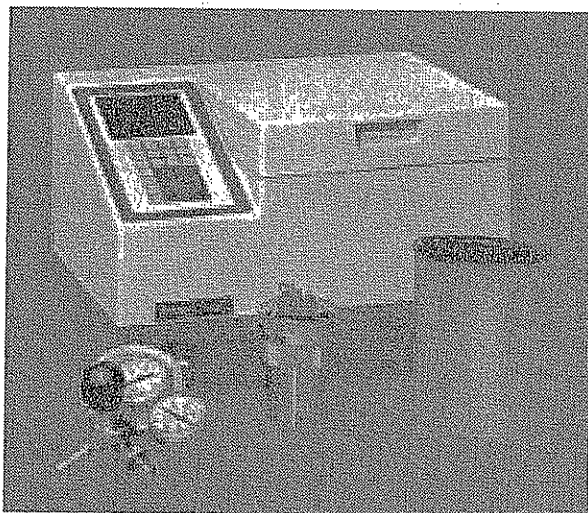
3.1.6 TOPLOTNA MOĆ (energetska vrednost, kalorična vrednost, toplotni efekat) UGLJA

Glavni pokazatelj kvaliteta uglja pri sagorevanju je količina toplote koja se oslobadnja. Kod uglja i ostalih fosilnih goriva razlikujemo gornji toplotni efekat (GTE) ili gornju toplotnu moć i donji toplotni efekat (DTE) odnosno donju toplotnu moć.

Gornja toplotna moć GTM (gornja kalorična vrednost) je količina toplote koja se oslobađa kod potpunog sagorevanja 1 kg goriva u atmosferi kiseonika (pod pritiskom od 25 atm), u kalorimetrijskoj bombi (Berthelot-Mahlerovoj bombi), pri čemu se proizvodi sagorevanja

ohlade do početne temperature od 20° C a vodena para se u potpunosti kondenzuje odnosno pretvara se u tečno stanje. Kod potpunog sagorevanja ugljenik prelazi u ugljen dioksid, vodonik u vodu, sagorljivi sumpor u sumpor dioksid dok azot ne oksidira.

Donja toplotna moć DTM (donja kalorična vrednost), koja je najčešće u upotrebi, predstavlja onu količinu toplote koja se razvija kod potpunog sagorevanja 1 kg goriva, pri čemu se proizvodi sagorevanja ohlade do početne temperature od 20° C ali se smatra da voda ostaje u obliku pare odnosno nekondenzovana.



Sl.3.5 Kalorimetar i kalorimetrijska bomba. Legenda: 1-ventil za dovod kiseonika; 2-ventil za odvod gasova; 3 i 4-dva priključka za struju; 5-elektroda; 6-cevza dovod kiseonika i druga elektroda; 7-posuda za sagorevanje; 8-žica nosač posude i kontakt; 9-reflektor toplote; 10-kondenzat.

Gornju i donju toplotnu moć kod čvrstih goriva merimo obično u kilo džulima po jednom kilogramu goriva (kJ/kg). (Ukoliko je toplotna moć izražena u kcal/kg, starima jedinicama, vrednost treba množiti sa približno 4,19).

Merenje gornje toplotne moći ili efekta vrši se u kalorimetrijskoj bombi gde uzorak goriva sagoreva pomoću kiseonika. Donja toplotna moć ili efekat ne možemo neposredno meriti već ga izračunavamo iz vrednosti gornje toplotne moći.

Toplota se obrazuje na račun sagorevanja pri sagorevanju ugljenika, vodonika i sagorljivog sumpora, pa je toplota sagorevanja u funkciji sastava organske mase uglja. Ova činjenica omogućava da se toplota sagorevanja uglja može približno izračunati na osnovu podataka elementarne analize uglja. U tu svrhu se koriste mnoge formule dobijene empirijski za određene tipove uglja.

Rezultati dobijeni ovim računanjem se više ili manje približavaju onima dobijenim neposrednim merenjem u kalorimetrijskoj bombi jer nije moguće u obrascima uzeti u obzir kompleksne hemijske veze koje se javljaju u uglju a utiču na oslobađanje toplote prilikom sagorevanja.

Značajan uticaj na donju toplotnu moć pojedinih vrsta uglja ima sadržaj vlage (vode) i pepela. Sa povećanjem sadržaja pepela a naročito vlage u uglju smanjuje se donja toplotna moć. Pošto se sadržaj vlage i pepela u uglju menja u širokom rasponu često vršimo preračuna-

vanje donje toplotne moći na čistu ugljenu supstancu bez vlage i pepela ili na suhu ugljenu supstancu bez vlage. Toplotna moć ili efekat uglja bez vlage i pepela se malo menja za određenu vrstu uglja i određeno ležište.

Tablica 3.2 DTM kod različitih tipova uglja

	Vrste uglja ili čvstog goriva	DTM. (kJ/kg)
1.	Lignit	5500-13500
2.	Sušeni lignit (po Fleisneru)	13800-18800
3.	Briketirani lignit	19200-20900
4.	Polukoks i lignit	20900-25100
5.	Mrki ugalj	14600-24700
6.	Kameni ugalj	25100-32000
7.	Briketirani kameni ugalj	27600
8.	Koks	27200-29300
9.	Metahurški koks	29300-30100
10.	Antracit	31400-33100

Prosečna donja toplotna moć za kamene ugljeve, sa ovih područja, iznosi oko 25100 kJ/kg. Visok sadržaj pepela kod jednih i visok sadržaj sumpora kod drugih vrsta kamenog uglja ograničava njegovu upotrebu. Mrki ugljevi takođe imaju različite vrednosti donje toplotne moći i kreću se obično između 14600 i 21700 kJ/kg. Prosečna vrednost donje toplotne moći za naše mrke ugljeve iznosi oko 16700 kJ/kg.

Kod lignita donja toplotna moć krupnijih klasa kreće se u rasponu od 7500 i 13400 kJ/kg. Kod sitnijih klasa, ispod 30 mm, a koje se većim delom koriste kao gorivo velikih termoelektrana, donja toplotna moć je znatno niža. Tako je DTM sirovog lignita za potrebe termoele-

ktrana iz Kolubarskog i Kosovskog basena u rasponu 5500 i 7000 kJ/kg što predstavlja danas najnižu moguću granicu kod koje još postoje mogućnosti ekonomske izgradnje ložišta u velikim kotlovskim postrojenjima termoelektrana.

Tablica 3.3 Podela čvrstih goriva prema sadržaju isparljivih materija.

Vrsta uglja	Sadržaj isparljivih materijala u organskoj supstanci (%)	Osobine plamena	DTM kJ/kg
Kameni ugalj Antracit	5–10	kratak i slabo svetli	35400
Posni ugalj	10–14		
Koksni ugalj	14–30	srednje dugačak jako svetli	35400–34900
Gasni i dugoplameni ugalj	30–48	dugačak i svetleći	34900–31000
Mrki ugalj	43–55	dugačak i svetleći	31000–27600
Lignit	53–65	dugačak i svetleći	29300–23900
Treset	65–73	dugačak i svetleći	23900–20900
Drvo	73–80	vrlo dugačak i svetleći	20900–14200

3.1.7 ISPARLJIVE MATERIJJE - VOLATILI

Ispitivanje svojstava goruće mase izvodi se putem termičkog razlaganja uglja na čvrstu i gasovitu fazu žarenjem uglja na temperaturi $850 \pm 25^\circ \text{C}$ bez prisustva vazduha.

U isparljive materije (volatile) ulaze pare i gasovi koji se izdvajaju pri termičkom razlaganju uglja, a to su: vodena para, ugljen monoksid, ugljen dioksid, vodonik, različiti ugljovodonici, sumporni gasovi, amonijak itd. Sadržaj isparljivih materija izračunava se na goruću masu i u takvom vidu pojavljuje se kao osnovni klasifikacioni parametar uglja. Količina isparljivih materija opada sa stepenom metamorfizma uglja, od 67 do 41 % (mrki ugljevi) ili 7,5 do 1 % (poluantraciti i antraciti). Podela čvrstih goriva prema sadržaju isparljivih materija, osobinama plamena sagorevanja i donjoj toplotnoj moći, data je u tablici 3.3. Čvrsta faza dobijena termičkim razlaganjem uglja naziva se neisparljivi ostatak, a kod koksujućih ugljeva - koks. Žarenje uglja obavlja se u električnoj mufolnoj peći na temperaturi $850 \pm 25^\circ \text{C}$ bez prisustva vazduha, u trajanju od 7 minuta. Sadržaj isparljivih materija izračunati prema obrascu:

$$I = \frac{(M_2 - M_3)}{M_2 - M_1} \cdot V \cdot 100 \quad (\%)$$

gde su:

- I - sadržaj isparljivih materija u uzorku (%);
- M_1 - masa zdelice i poklopca (g);
- M_2 - masa zdelice, poklopca i uzorka pre žarenja (g);
- M_3 - masa zdelice, poklopca i uzorka posle žarenja (g);
- V - sadržaj vlage u uzorku.

Isparljive materije mogu se odrediti i računskim putem prema obrascu:

$$I = S_m - C_{\text{fix}}$$

gde su:

- I - isparljive materije
- S_m - sagorljive materije
- C_{fix} - nevezani ugljenik.

Osobine dobijenog koksa kod laboratorijskih ispitivanja karbonifikacije kao i osobine plamena kod sago-

revanja isparljivih materija omogućuju utvrđivanje ponašanja uglja kod procesa sagorevanja.

Razvrstavanje ugljeva u vrste prema sadržaju isparljivih materija je različito u pojedinim zemljama.

Obično kod kamenih ugljeva prvu vrstu predstavlja antracit sa 0 do 1 % isparljivih materija, nadalje slede posni ugljevi sa 10 do 14 % i koksni ugljevi sa 14 do 30 % isparljivih sastojaka koji su najpodesniji za proizvodnju metalurškog koksa. Razne vrste mrkih ugljeva imaju 43 do 55 % isparljivih materija a za lignite se ova vrednost kreće između 53 i 65 % dok ona iznosi kod treseta 65 do 73 % a kod drva od 73 do 80 %. Granice između pojedinih vrsta uglja nisu sasvim oštre već postoji postepeni prelazak iz jedne vrste u drugu.

Osim navedene podele ugljeva postoji i međunarodna klasifikacija ugljeva u klase, grupe i podgrupe (CODE).

3.1.8 ODREĐIVANJE C_{fix}

C_{fix} se određuje računskim putem prema obrascu:

$$C_{\text{fix}} = K - p$$

gde su:

- C_{fix} - nevezani ugljenik (%);
- K - koks (%);
- p - pepeo (%).

3.1.9 ODREĐIVANJE KOKSA

Čvrsti ostatak dobijen termičkim razlaganjem uglja na temperaturi $850 \pm 25^\circ \text{C}$ predstavlja neisparljivi deo rovnog uglja, a kod koksujućih ugljeva koks. Čvrsti ostatak ili koks sačinjavaju u stvari vezani ugljenik ili karbon-fix (C_{fix}) i pepeo (ukupni). Kod upoređivanja kvaliteta jednog uglja sa drugim, sadržaj volatila i koksa izračunava se na suhu i bezpepelnu ugljenu masu, odnosno neorganski deo rovnog uglja, iz čega sledi:

$$I + C_{\text{fix}} + p = 100 \quad (\%)$$

gde su:

- I - volatili (%);
- C_{fix} - nevezani ugljenik (%);
- p - pepeo (%).

Određivanje sadržaja koksa. U platinskom lončiću mase $25 \pm 0,5$ g, sa platinskim poklopcem koji dobro zaptiva, izmeri se 1 g uglja koji je predhodno samleven do finoće 100 % ispod 0,2 mm. Pošto se lončić dobro zatvori poklopcem, stavi se iznad Bunzenovog plamenika, i žari se 7 minuta. Pri sagorevanju gasovi izlaze ispod ruba poklopca. Nakon 7 minuta lončić se skida i hladi u eksikatoru, nakon čega se meri. Nakon toga se pristupa izračunavanju sadržaja koksa.

3.1.10 SUMPOR U UGLJU

U uglju se određuje **ukupni sumpor** - S ukupni i sumpor sadržan u pepelu (vezani sumpor) $S_{\text{neorganski}}$ a iz razlike ova dva sumpora dobija se sumpor organski (sagorljivi) - S_{organski} . Sadržaj ukupnog sumpora u uglju određuje se po metodi Eška i to: gravimetrijski i volumetrijski.

Gravimetrijsko određivanje sumpora sastoji se u sledećem: uzorak uglja izmeša se sa Eška smešom (2 težinska dela kalcinisanog magnezijum oksida sa 1 delom natrijum karbonata ili kalijum karbonata; krupnoća zrna uzorka je 100 % ispod 0,2 mm) i sagori u oksidacionoj atmosferi pri čemu se odstranjuju sagorljive materije a sav sumpor prevede u sulfat. Sulfati se ekstrahuju i gravimetrijski dalje određuju taloženjem sa barijumhloridom. Volumetrijsko određivanje sumpora sastoji se u sledećem: uzorak uglja izmeša se sa Eška smešom i sagori u oksidacionoj atmosferi. Sagorljive materije se odstranjuju a sav sumpor prevodi u sulfat, koji se dalje taloži volumetrijski sa barijum hromatom a rastvorni hromat se određuje jodometrijski. Sagorevanje uglja odvija se u električnoj mufolnoj peći.

3.2 LITERATURA

1. Dolivo-Dobrovol'ski, V.V., Klimenko, Iu.V., 1947: Ratsional'nyi analiz rud. – Metallurgizdat, Moskva.
2. Godovskaia, K.I., Zhivova, E.I., 1976: Sbornik zadach po tekhnicheskomu analizu. – Vysshiaia shkola, Moskva.
3. Manojlović-Gifing, M., 1976: Priprema mineralnih sirovina. – RGF, Beograd.
4. Ogorelec, I., 1967: Ugalj, eksploatacija i prerada. - Tehnička knjiga, Beograd.
5. Preigerzon, G. I., 1969: Obogashchenie uglia. - Nedra, Moskva.
6. Raikhtsaum, A. G., 1971: Khimicheskie laboratorii po issledovaniiu uglei. - Nedra, Moskva.
7. Rekalić, V., Vitorović, O., 1975: Analitička ispitivanja u tehnološkoj proizvodnji – principi i postupci. – Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd.
8. Stach, E., Mackowsky, M. Th., Teichmuller, M., Taylor, G., H., Chandra, D., Teichmuller, R., 1975: Coal petrology. - Gebruder Borntraeger, Stuttgart.

anec

a sle-
teži-
elom
zma
ionoj
rije a
gra-
lori-
se u
i sa-
e od-
ie ta-
bro-
dvija

va.

4

4.1

4.1

4.1

4.1

4.1

4.1

4.1

4.1

4.1

4.1

4.1

42

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

4.2

Abstract

SADRŽAJ GLAVE 4

4.1 MINERALNI SASTAV SIROVINE	71
4.1.1 Mineraloški uzorci	71
4.1.2 Izvor informacija	71
4.1.3 Metode ispitivanja i oprema	72
4.1.4 Analize modalnog sastava pri rešavanju zadataka u procesima koncentracije	76
4.1.5 Prognozna modalna ispitivanja	77
4.1.6 Istraživačka modalna ispitivanja	77
4.1.7 Karakterizacija mineralne sirovine uz pomoć analizatora slike	78
4.1.8 Razvoj sistema analize slike	80
4.1.9 Automatski analizator slike	81
4.1.10 Kvantifikacija vizuelnih informacija uz pomoć analizatora slike	82
4.1.11 Racionalna analiza	83
4.2 IDENTIFIKACIJA MINERALNIH ZRNA U PROIZVODIMA PMS	86
4.2.1 Uvod	86
4.2.2 Mineralni sastav sirovine	87
4.2.3 Sklop ruda	87
4.2.4 Mineralne parageneze	89
4.2.5 Tipovi orudnjenja	89
4.2.6 Fizičko-hemijske osobine minerala	90
4.2.7 Sjaaj	90
4.2.8 Boja	91
4.2.9 Ogreb ili prah minerala	92
4.2.10 Potamnjenje, zamagljenje	92
4.2.11 Prozračnost i providnost	92
4.2.12 Kohezijone osobine minerala	92
4.2.13 Tvrdina	92
4.2.14 Tvrdina po Vickersu	93
4.2.15 Klivaž, cepljivost	94
4.2.16 Deljivost	94
4.2.17 Površine kristala	94
4.2.18 Površine preloma minerala	94
4.2.19 Krtost i žilavost minerala	95
4.2.20 Bliženjenje minerala	95
4.2.21 Gustina minerala	95
4.2.22 Kristalne forme, stanja agregacije	96
4.2.23 Pseudomorfizam	96
4.2.24 Fiziološka svojstva (miris, opip, ukus, rastvorljivost)	96
4.2.25 Elektro osobine minerala (elektroprovodnost, elektootpornost)	97
4.2.26 Radioaktivne osobine minerala	97
4.2.27 Fluorescencija minerala	98

4.2.28 Pribor i instrumenti za determinaciju fizičkih i hemijskih osobina minerala	98
4.2.29 Stereobinokularni mikroskop	98
4.2.30 Kvalitativne hemijske analize	100
4.3 POLARIZACIONI RUDNI MIKROSKOP – RAD PRI REFLEKTOVANOJ SVETLOSTI	101
4.3.1 Ispitivanja mineralnih sirovina rudnim polarizacionim mikroskopom	101
4.3.2 Zadaci rudnomikroskopskih ispitivanja	101
4.3.3 Optičke metode dijagnostičkih ispitivanja	102
4.4 OPŠTA KONSTRUKCIJA I RAD RUDNOG MIKROSKOPA	102
4.4.1 Fokusiranje i centriranje mikroskopa	102
4.4.2 Objektiv	103
4.4.3 Okulari	104
4.4.4 Čuvanje i održavanje sočiva	104
4.4.5 Polarizator i analizator	104
4.4.6 Reflektori - konstrukcija i njihovo korišćenje	106
4.4.7 Iluminacioni sistem	107
4.5 KVALITATIVNE OPTIČKE OSOBINE RUDNIH MINERALA	107
4.5.1 Boja minerala	107
4.5.2 Birefleksija i refleksioni pleohroizam	108
4.5.3 Ispitivanje u koso padajućoj svetlosti	109
4.5.4 Osmatranje minerala pri ukrštenim polarizatorima	110
4.5.5 Unutrašnji refleksi	110
4.5.6 Tvrdina minerala	111
4.5.7 Određivanje tvrđine minerala metodom paranja	112
4.5.8 Određivanje tvrđine minerala po relativnom reljefu	112
4.5.9 Tvrdina na ogreb	112
4.5.10 Tvrdina na poliranje	112
4.5.11 Vickers-ova tvrđina – VHN	113
4.5.12 Tvrdina minerala Kalb-ovim metodom	115
4.5.13 Strukturna nagrizanja	116
4.5.14 Bliženje minerala	117
4.5.15 Zonalnost minerala	117
4.5.16 Cepljivost minerala	118
4.5.17 Forme zrna	118
4.5.18 Rad u imerziji	118
4.5.19 Metode merenja veličine mineralnih zrna	119
4.6 KVANTITATIVNA ANALIZA U RUDNOJ MIKROSKOPIJI	119
4.6.1 Tehnike merenja	119
4.6.2 De Lesse-ov metod (planimetrijski)	119
4.6.3 Rosiwal–Shand metod (linijski)	121
4.6.4 Glagolev-Chayes metod (tačkasti)	124
4.6.5 Tačnost analiza sirovine i proizvoda PMS uz pomoć rudnog mikroskopa	126
4.6.6 Fleet-ov metod	127
4.6.7 Van der Plas-ov metod traka	128
4.6.8 Galehouse-ov linijski metod	129
4.7 PRIPREMA PREPARATA ZA RUDNU MIKROSKOPIJU	129
4.7.1 Uvod	129
4.7.2 Sečenje uzoraka	129
4.7.3 Mašine i uređaji za sečenje i grubo brušenje	131
4.7.4 Brušenje - grubo i fino	132
4.7.5 Poliranje - grubo i fino	132
4.7.6 Impregnacija, zalivanje, presovanje i briketiranje	133
4.8 LITERATURA	135

GLAVA 4

4.1 MINERALNI SASTAV SIROVINE

Jedan od pokazatelja kvaliteta mineralne sirovine je i mineralni sastav. U osnovi, pod mineralnim sastavom se podrazumeva određivanje svih mineralnih vrsta sadržanih u sirovini - korisnih, štetnih i minerala jalovine. Za određivanje kvalitativnog i kvantitativnog mineralnog sastava mineralne sirovine, ili proizvoda PMS, koristimo termin modalni mineralni sastav odnosno modalna mineraloška analiza.

Za određivanje mineralnog sastava izdvajaju se primerci iz uzorka sirovine pre usitnjavanja (drobljenja), koji treba da obuhvate svu raznolikost u pogledu strukturno - teksturnih karakteristika, asocijacije minerala, stepena poroznosti, ispucalosti, zdrobljenosti, oksidacije itd. Od izdvojenih primeraka izrađuju se rudni i petrografski preparati za ispitivanje minerala u odbijenoj i propuštenoj svetlosti, odnosno, za određivanje mineralnog sastava sirovine. U slučajevima kada ne mogu da se dijagnosticiraju minerali pomoću mikroskopa, primenjuju se rendgendifrakciona analiza, spektralna analiza, DTA, TGA, SEM, TEM i druge analize.

4.1.1 MINERALOŠKI UZORCI

Geološki uzorci, a posebno mineraloški, (prikupljeni na ležištu ili otkopanoj sirovini) su retko reprezentativni (sa aspekta PMS ili u statističkom smislu) za neku sirovinu, rudno telo ili ležište, u stvari, za mnoge od njih se može, s izvesnom dozom opreza, reći da su nereprezentativni, u nekom smislu, međutim, količina i vrednost podataka koje oni mogu da pruže tokom ispitivanja, time nikako neće biti umanjena.

U stvari, treba shvatiti i imati u vidu, na samom početku, da je vrlo važno ispitati kako reprezentativne tako i "slučajne" (mineraloške) uzorke jer će reprezentativni srednji uzorci pružiti više ili manje kvantitativnih informacija a slučajni ili "nereprezentativni" uzorci pružiti kvalitativne informacije.

Jedan od velikih nedostataka reprezentativnih srednjih uzoraka je taj da su ovi uzorci najčešće usitnjeni

(to je jedan od načina da bi se uopšte došlo do homogene smeše reprezentativnog uzorka), oni su u stvari na taj način pretrpeli izvesne promene i nisu više u svom prirodnom stanju čime se izvesne informacije (strukturno-teksturne karakteristike, međusobni odnosi minerala, izmene minerala) trajno gube u toj prvoj fazi obrade srednjeg uzorka.

Postoji još nešto važno, što treba uzeti u obzir kod reprezentativnih uzoraka, a to je da je na takvom materijalu (izdrobljen, homogeniziran) vrlo teško razjasniti razlike, u pogledu mineralnog sastava za jedno rudno telo ili ležište (jer je malo verovatno da će celo rudno telo biti samleveno odjednom), u pogledu zonarnosti, slojevitosti ili nekog drugog obeležja (jer se ruda priprema i otkopava po fazama) stoga je vrlo važno izučiti takve razlike unapred jer će one bitno uticati na dalji tehnološki tretman.



Važnost dobijanja mineraloških podataka, potrebnih za neki novi projekat, što je moguće pre, ne treba suviše naglašavati i potencirati, čak i ako neki od primarnih, inicijalnih uzoraka nije srednji reprezentativan.

Prema tome, ispitivanja se izvode na raznim vrstama uzoraka; svaki uzorak ima svoju, drugačiju, namenu, pa se prema tome i metode ispitivanja mogu razlikovati.

4.1.2 IZVOR INFORMACIJA

Ukoliko, jedno postepeno i sistematsko izučavanje nekog rudnog tela, nije moguće iz nekog razloga sproveći, a ispitivanja mineraloških uzoraka se izvode na "parče", po fazama i sporadično, neophodna osnova za jedno potpuno razumevanje problema će sigurno izostati. Ovakva situacija može biti popravljena do izvesne mere korišćenjem različitih izvora informacija. Prikupljanje informacija će uključiti, kako publikovane radove, tako i nepublikovane, u posedu preduzeća i državnih istraživa-

vačkih organizacija (fond stručne dokumentacije), kao što su geološki zavodi i instituti, zatim naučni i stručni članci, izveštaji, studije i istraživački projekti, magistarske teze, doktorske disertacije i druge akademske publikacije, kao i izveštaji laboratorija i različiti rudarski planovi. Dragoceni podaci mogu se pronaći i u istorijskim dokumentima i opisima, kao i proučavanjem kolekcija stena i minerala na samom ležištu, odnosno rudniku koje poseduju bivši i sadašnji zaposleni. Bez obzira što svako ležište ima svoje karakteristike vrlo je korisno da se izuče neki tipični primeri, drugih, sličnih ležišta i sirovina koji nam mogu pružiti korisne odgovore, u okvirima mineraloških ispitivanja, isto tako možemo proučiti i metode ispitivanja i način rešavanja određenih problema.

Veći deo izvornog materijala koji će se koristiti biće nedovoljan ili će sadržati nedovoljno podataka koje su nama potrebni. Neki izveštaji su pisani sa nedovoljnom jasnošću ili se u njima koristi mnoštvo nepoznatih tehničkih termina. Često korišćenje vrlo stručnih (za jednu struku) termina ne daje izveštajima posebnu vrednost jer se time gubi sam smisao dobre komunikacije. Ovo je posebno važno kod izveštaja rudničkog geologa ili procesnog mineraloga koje treba da razumeju grupe ljudi iz potpuno različitih struka i profesionalnih preokupacija (tu se moraju uključiti direktori kompanija, upravnici rudnika, inženjeri PMS, uzimači uzoraka, nadzornici i vođe smena).

Problem koji se javlja na velikim rudnicima jeste distribucija informacija koje su od koristi za više od jedne službe na rudniku. Tako recimo izveštaj namenjen geološkoj službi, o povećanom sadržaju nepoželjnog minerala u jednom rudnom telu, sigurno će biti interesantan za "pripremaša" ili "podzemljaša". Prema tome, autori takvih izveštaja, treba da ih pišu ili komentarišu tako da budu razumljivi i osoblju drugih službi na rudniku, i da se osigura (koliko je to moguće) da izveštaji stižu do svih koji su za njih zainteresovani.

Treba posebno istaći da jasan, logičan izveštaj, sa minimalno upotrebljenih stručnih termina tehničkog "žargona", koji se lako čita i razume, pruža veliku količinu korisnih i zahvalnih informacija, čime ispunjava sam smisao komuniciranja.

4.1.3 METODE ISPITIVANJA I OPREMA

Posmatranje slobodnim okom je najjednostavniji način za ispitivanje sirovina i uzoraka minerala. Ovaj način ispitivanja može biti vrlo koristan jer omogućuje da se sposobnost zapažanja (posmatranja), naučni pristup i logično zaključivanje u potpunosti iskoristi i razvije. Mnoge važne karakteristike mogu biti zabeležene već u ovoj fazi, posebno pri izučavanju stena, rude, jezgara iz bušotina i drugih vidova komadastih primeraka materijala na samom terenu. Ove karakteristike obuhvataju pukotine, prsline ili neke druge oslabljene zone koje na izvestan način utiču na metode otkopavanja i usitnjavanja, tu je i slojevitost, kontakti orudnjene zone i jalovine (koji mogu biti oštri kod rudnih žica ili široki sa postepenim prelaznim zonama), raspodela minerala, stepen oksidacije ili nekog drugog obeležja alteracije kao posledice supergenih geoloških procesa. Prirodno je da, se neke karakteristike većih razmera mogu zapaziti i izučiti jedino ako se proučavaju na uzorcima većih

dimenzija. Malo je verovatno da se strukture pukotina ili slojevitost može izučavati, primera radi, na mlevenom uzorku sa krupnoćom zrna ispod 2 mm. Makroskopski izučene karakteristike su daleko važnije za sirovine čiji je krajnji proizvod relativno krupnokomadasti materijal (građevinski kamen, ukrasni kamen). Tako je u kamenolomima i preradi (drobljenju, mlevenju, klasiranju) kamenog agregata za putogradnju, građevinarstvo ili ukrasni kamen - poznavanje teksturnih osobina, ruptura, pukotina i opšta ispucanost, veličina agregata u brečastim zonama, sadržaj minerala glina (koje bubre), sadržaj oksida gvožđa, produkata raspadanja su od primarne važnosti jer će u znatnoj meri uticati na metode eksploatacije i prerade kako bi se dobio odgovarajući proizvod. Slična razmatranja su neophodna za mnoge, posebno nemetalične mineralne sirovine, kod kojih se korisni mineral nalazi u masivnoj stenskoj masi, a pri tome se vrši površinska eksploatacija. Međutim danas postoji jedna tendencija da se sirovina sve strožije kontroliše kako bi se postigli odgovarajući kvaliteti. Dobar primer predstavlja magnezit na čiji kvalitet, fizičke i hemijske karakteristike, nečistoće imaju itekakav uticaj.

Korišćenjem jednostavnih optičkih pribora, kao što je lupa, znatno se može povećati količina informacija koja se može dobiti. Ispitivanje uz pomoć lupe (uvećanja 8x do 10 x) je posebno pogodno za komadaste uzorke i materijal iz jezgara istražnih bušotina kako bi se utvrdila i identifikovala većina minerala i mogao izučiti njihov međusobni odnos, asocijacija minerala i kako bi se prikupilo više detalja, karakteristika prisutnih minerala nego što je to bilo moguće golim okom. Količina informacija koje se mogu dobiti su u zavisnosti od krupnoće zrna prisutnih minerala.

Stereobinokularni mikroskop je verovatno jedan od najkorisnijih i najjednostavnijih instrumenata i predstavlja vrlo važan deo pribora geoloških laboratorija, laboratorija i postrojenja za PMS, metalurških laboratorija i svih onih mesta gde se mineraloški uzorci ispituju. Dobar stereobinokularni mikroskop, sa stepenom povećanja 5x do 50x u stvari premošćuje onaj deo ispitivanja koja se izvode na krupnokomadastim uzorcima slobodnim okom ili lupom i složenih ispitivanja koja se izvode pomoću boljih mikroskopa. Dobro obučeni istraživač na podešenom kvalitetnom stereobinokularnom mikroskopu može doći do niza vrlo detaljnih podataka ispitujući uzorke - identifikacija prisutnih minerala, strukturni odnosi, veličina zrna, oblik zrna a posebno o površinskim karakteristikama minerala, kao što su zamagljivanja, oksidacija, presvlačenje i druge.

Korišćenje stereobinokularnih mikroskopa treba da bude što češće i na svakom mestu, stoga korisnici - istraživači treba da budu dobro obučeni kako bi se dobili optimalni rezultati. Uz dobar iluminator treba se koristiti odgovarajućim priborom kao što je čelična igla, pin-ceta, predmetno i sahatno staklo, ručni magnet, alkohol i određene imerzije, keramička pločica i papirna maramica. Pribor treba da je čist kako bi se sprečila kontaminacija uzoraka.

Kad god je to moguće sa uzoraka treba odstraniti nečistoće (odprašiti ili odmuljiti), a pogodno ih je ispitivati mokre kako bi se moglo zapaziti više detalja; voda koja se koristi za kvašenje može da sadrži određenu količinu deterdženta, međutim u slučaju da uzorak treba ispitivati na suvo ili ga posle ispitivanja treba vratiti, u tom slu-

čaju se preporučuje alkohol. Kada se ispituju vrlo sitna zrna, čestice može se koristiti određena imerziona tečnost. Takođe je važna i pozadina - osnova na kojoj se nalazi materijal koji se ispituje, ponekad je ona i presudna; svetli minerali generalno zahtevaju tamnu pozadinu i obrnuto, ali se najbolji uslovi utvrđuju eksperimentalno. Korisno je imati komadiće različito obojenih kartona ili sličnog materijala kako bi se mogli postaviti pod predmetno staklo sa uzorkom (ili Petri-jev sud) tokom ispitivanja. Podvlačenje, naizgled tako trivijalnih stvari ima osnove u iskustvu kroz praksu tokom rada u laboratoriji. Izbor prave podloge i odgovarajućeg tečnog medijuma može suštinski da izmeni uslove ispitivanja a prema tome i odgovarajuće rezultate.

Identifikacija minerala pomoću stereobinokularnog mikroskopa nije samo ograničena na njihove optičke karakteristike (kao što je slučaj sa optičkim mikroskopima) već se mogu dopunjavati i drugim testovima. Prednosti ispitivanja stereobinokularnim mikroskopom su da se mogu analizirati zrna, čestice, širokog raspona krupnoće - od veličine zrna izdrobljenog materijala ili proizvoda mlevenja, kao i čestice prašine kod udarnog bušenja do sasvim finih čestica (do 20 μm) koje se mogu posmatrati trodimenzionalno a detalji njihovih fizičkih karakteristika i međusobnih odnosa faza u njima mogu se videti. Testovi na tvrđinu, magnetske osobine, boju ogreba, cepljivost i gustinu mogu se uvek izvesti, ukoliko je neophodno za svako pojedinačno izdvojeno zrno. Takođe, zrna nepoznatih minerala mogu biti ručno izdvajana uz pomoć mikroskopa, zbog njihove velike "radne distance" ispod samog objektiva, za dalja testiranja kao što su hemijska analiza, rengen difrakciona analiza, mikrosonda, skening elektronsku mikroskopiju ili za neka druga.

Svakodnevna identifikacija pojedinačnih minerala se većinom zasniva na iskustvu a u slučaju ispitivanja poznatog materijala (iz sopstvenog rudnika ili pogona za PMS) identifikacija se oslanja na prepoznavanje komponentata koje su normalno prisutne u datoj rudi. U slučaju identifikacije minerala nepoznatih uzoraka neophodno je izvesti većinu "klasičnih" tehnika identifikacije minerala, odlično opisanih u mnogim udžbenicima, koristeći zrna ispod 100 μm ili čak sitnija. Korišćenje samo stereobinokularnog mikroskopa kod identifikacije teško prepoznatljivih minerala, neprovidnih oksida i retnih sulfida, svakako da je nedovoljno.

Ako se dovoljno pažljivo i strpljivo radi iznenađujuće je koliko se mnogo informacija može dobiti koristeći pri ispitivanju stereobinokularni mikroskop; jedna od velikih prednosti ovakvih ispitivanja je da nije neophodna posebna priprema uzoraka, nasuprot složenijim ispitivanjima polarizacionim mikroskopom.

Ispitivanja u propuštenoj i odbijenoj svetlosti polarizacionim mikroskopom je mnogo kompleksnije i zahteva jedan viši nivo znanja i prakse; tehnike su mnogo ograničenije i zavise od kvalifikovanosti istraživača i to ne samo za zadata aktuelna ispitivanja i istraživanja već i za pripremu materijala koji će biti ispitivan. Sama priprema materijala zahteva određene kvalifikacije, odgovarajuću opremu, laboratorijski prostor kao i obučene tehničare. Preporučljivo je da se ovi poslovi (priprema, ispitivanja i istraživanja) odvijaju u centralnoj laboratoriji koja može opsluživati veći broj korisnika, jer troškovi, koji su obuhvaćeni potrebnom opremom, održava-

njem i brojem zaposlenog osoblja u laboratoriji za mikroskopiju, mogu biti opravdani jedino ako se koriste u potpunosti i puno radno vreme.

Polarizacioni mikroskopi rade na dva načina. Petrografski polarizacioni mikroskopi koriste propuštenu svetlost za identifikaciju i izučavanje prozirnih minerala gde su većinom uključeni minerali jalovine, ekonomski interesantne nemetalične mineralne sirovine i većina minerala iz rasipnih ležišta (peskovi). Rudni polarizacioni mikroskopi koriste reflektovanu svetlost za izučavanje i identifikaciju neprovidnih metalnih minerala koji obuhvataju sulfide, elemente metala i izvesne okside. Ova dva načina zahtevaju i različite postupke pripremanja specijalnih uzoraka. Najjednostavniji način je kada se zrna providnih minerala postave na predmetno staklo, pri čemu može da se koristi odgovarajući medijum (glicerol, organska smola) bez dalje pripreme sem ako je u uzorku prisutan vrlo sitan materijal gde ga je u tom slučaju neophodno odstraniti pre postavljanja na predmetno staklo (odprašivanje ili odmuljivanje). Zrna krupnija od 300 μm generalno nisu pogodna za ovaj tip ispitivanja jer pri toj krupnoći postaju nedovoljno prozirni tako da se različite komponente u samim zrnima i agregatima kristala ne mogu zadovoljavajuće identifikovati. Postupak je, prema tome, pogodan za materijal čija je krupnoća ispod 300 μm i ima tu prednost da može biti ispitivan relativno brzo i jeftino sa malom ili neznatnom pripremom uzoraka. Minerali peskova, minerali šlihovala, uzorci jalovine, određene frakcije minerala pogodne krupnoće zrna mogu biti ispitivani na ovaj način.

Podaci koji treba da se prikupe o prozirnim mineralima, kada je materijal koji se ispituje veće krupnoće zrna od 300 μm pre samog ispitivanja je neophodno pripremiti specijalne petrografske preparate - vrlo tanak odsečak (oko 30 μm debljine) ispitivanog materijala postavljenog na predmetno staklo.

Priprema ovakvih preparata je složen postupak koji zahteva specijalnu opremu za sečenje kao i odgovarajuće brušenje i poliranje. Materijali koji se na ovaj način pripremaju su: geološki krupnokomadasti uzorci, jezgra iz bušotina, odlomci materijala udarnog bušenja, uzorci nakon drobljenja i mlevenja kao i različiti uzorci iz industrijskih procesa. Podaci koji se dobijaju pri ovim ispitivanjima providnih minerala su: kvalitativno - kvantitativne karakteristike minerala, strukturni odnosi i asocijacija minerala, njihov odnos prema sulfidnim ili nekim drugim neprozirnim mineralima i druge karakteristike. Isto tako, izučavanja providnih - petrografskih preparata, pružaju mnoge podatke od interesa samim geolozima, a to su geneza date rude, sukcesivnost odlaganja minerala i paragenetski odnosi, alteracija stena i drugi podaci. Paragenetski odnosi u rudnom ležištu, pored geološkog značaja, imaju i neposrednog značaja na procese pripreme; na primer ako paragenetski odnos pokaže da je u datom ležištu arsenopirit deponovan pre kasiterita, to će značiti da kasiterit ne može imati u sebi inkluzija arsenopirita.

Ispitivanje neprozirnih minerala, posebno sulfida, zahteva rad sa polarizacionim mikroskopom u odbijenoj svetlosti - rudnim polarizacionim mikroskopom; iz tih razloga neprozirni minerali svih krupnoća, kao i produkata mlevenja, moraju prvo biti ispolirani kako bi ih pripremili da reflektuju svetlost. Bez obzira što je možda tehnički izvodljivo sečenje, brušenje i poliranje uzo-

raka stena, uzoraka rude ili bilo kog materijala svi uzorci moraju biti, pre nego što će se polirati, prekriveni, natopljeni odnosno impregnirani (nekom organskom smolom), pri čemu su pogodniji oni postupci koji se izvode "na hladno". Postupak za pripremu briketiranih poliranih preparata zahteva odogovarajuće uređaje i određenu stručnost. U laboratorijama u kojima se pripremaju petrografski preparati i rudni preparati jedan deo uređaja se može koristiti za oba postupka, dok proces poliranja rudnih preparata zahteva dodatne uređaje i postupke.

Mikroskopi koji se koriste za ova ispitivanja su specijalni instrumenti, polarizacionog tipa koji omogućuju dijagnosticiranje optičkih i fizičkih parametara koji treba da budu određeni da bi pojedinačni minerali bili identifikovani. Strukture i krupnoća zrna mogu biti opisani ili izmereni a sve to može biti, najčešće, dokumentovano mikrofotografijama. Mikrofotografije su pogodan materijal pri sastavljanju izveštaja a njihova važnost i značaj moraju se posebno istaći. Prikladno je kada se pripremi serija slajdova o materijalu koji se istražuje, a odgovarajuće fotografije unesu u pisane dokumente – izveštaje, naučne članke ili prezentacije.

Konsultovanje sa stručnjacima za ovu oblast može biti najprihvatljivija alternativa i najpogodnija mogućnost u onim slučajevima kada neka organizacija nije u mogućnosti da obezbedi sopstvenu laboratoriju i istraživački tim.

Efektivnost rada sa konsultantima će se znatno poboljšati ukoliko su oni sami podstaknuti tako što će biti uključeni u same projekte i ako isti budu učestvovali konsistentno u smislu kontinuiteta i angažovanosti.

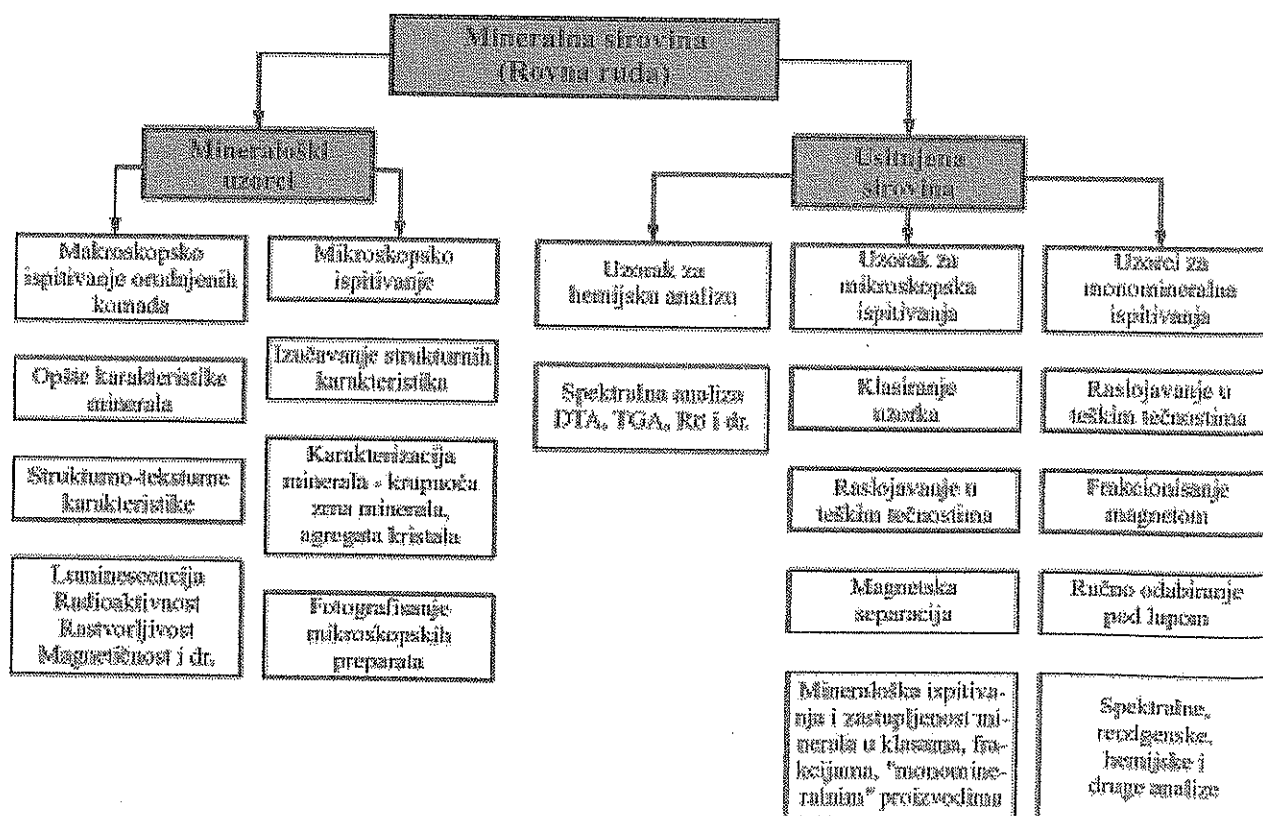
Kod izvođenja mineraloške analize sirovine ili proizvoda koncentracije (ulazna ruda, koncentrat, međuprodukt, jalovina) određuju se:

- Vrste rudnih i nerudnih-petrogenih minerala;
- Fizičke i hemijske karakteristike minerala;
- Morfološke karakteristike ekonomski korisnih minerala;
- Teksturane karakteristike sirovine i strukturne karakteristike korisnih minerala kao i načini međusobnih srastanja i izgledi za njihovo oslobađanje i druge karakteristike.

Savremeni postupci mineraloških istraživanja sirovine i minerala obuhvataju još i: određivanje refleksije minerala, pH vrednost suspenzije minerala, analizu granulometrijskog sastava, rastvorljivost minerala, određivanje termoelektričnih osobina minerala, određivanje dielektričnih i elektrostatičkih osobina minerala i dr.

Na slici 4.0 je data jedna opšta šema mesta i metoda mineraloških analiza ruda u pripremi mineralnih sirovina. Pribori i instrumenti kojima se izvode ove analize prikazani su u tablici 4.1. A osnovni mineraloški podaci neophodni za uspešno vođenje procesa ili laboratorijska ispitivanja prikazani su u tablici 4.2.

Ispitivanje strukturno-teksturnih karakteristika, prvenstveno rudno mikroskopskom analizom, i značaj informacija koje takve analize mogu da pruže, a koje su neophodne pri valorizaciji mineralne sirovine, prikazani su sumarno u narednoj tablici 4.3.



Sl.4.0 Mesto i uloga mineraloških analiza ruda i proizvoda koncentracije u pripremi mineralnih sirovina

anec

i pro-
nedu-

i mi-

arak-
obnih
hruge

rovi-
ksije
gra-
redi-
vanje

stoda
rovi-
alize
odaci
ijska

pr-
ij in-
e su
izani

[]

[]

[]

[]

[]

Tablica 4.1 Pregled metoda ispitivanja, priprema i vrste uzoraka i informacije koje pružaju

Metoda ispitivanja	Vrsta materijala	Priprema uzoraka	Informacije
1. Slobodnim okom	Pojedinačni uzorci jezgre bušotina, proizvod dробljenja	Pranje i obrada, kvadriranje površina	Ispunjenost, pukotinski sustav - razmjeri, učestalost, dimenzije, ulazak, ispuštanje, poroznost - dimenzije, oblici, razmjeri; krupnoća zrna, distribucija minerala, alteracija, oksidacija, tvrdina, ovisnost ovisnosti oslobađanja. Mogu biti dopunjeni i drugim postupcima: pranje u UV i rendgenskim zračenjem, radioaktivnost, rastvorljivost.
2. Stereoskopski mikroskop	Kao i prethodni plus - praš udarnog bušenja, šifrovski minerali, proizvodi mljevenja, peskovi	Oprašivanje i odmaštivanje	Identifikacija krupnozrnatih minerala i prepoznavanje njihovih struktura - oblika i veličina zrna, skrami i preklapanje kod minerala iz sljedećih i elavijalnih ležišta, analiza određenih frakcija (lake, teške, magnetične, nemagnetične).
3. Polarizacijski mikroskop			
3a. Propuštanje svetlosti	Svi materijali od krupnozrnog do finozrnog	Natopljeni zrna ili petrografski preparati	Općika determinacija pojedinačnih proziranih minerala, asocijacije, strukture, krupnoća zrna, inkluzije; izučavanje paragenetskih odnosa izučavanje građje minerala - zonarnost, mikropukotins, promjene sa - stava, vrste alteracije.
3b. Reflektivna svetlost	Kao i prethodni	Polirani rudni preparati, briktirani - zaliveni u smole	Determinacija svih neproziranih mineralnih vrsta, posebne sulfida, oksida i njima bliskih mineralnih vrsta; unutrašnja građja, inkluzije, stvaranja, promjene sastava i alteracije.
4. Specijalne tehnike			
4a. Difrakcijska Ro-analiza	Kristalaste materije	Posebna priprema uzoraka	Identifikacija izuzetno sitnih objekata (glina, produkti raspadanja); identifikacija nepoznatih minerala često semikvantitativno.
4b. Elektronska mikrosonda	Sve prirodne materije i veštačke supstance	Polirani rudni preparati, briktirani	Omogućuje elementarnu analizu na izuzetno maloj površini materijala; su visokom točnošću i pri izuzetno malim sadržajima određenih elemenata.
4c. Sistem analitatorske slike	Kao i prethodni	Polirani rudni preparati, briktirani	Identifikacija minerala, mikrometrijska mjerenja, klasifikacija struktura, animacije oslobađanja, statistička obrada i dr.

Tablica 4.2 Mineraloški podaci neophodni pri planiranju i kontroli procesa pripreme mineralnih sirovina

Mineraloške karakteristike	Postupci dobijanja
1. Dijagnostika minerala	Šema dijagnosticiranja minerala; kompletna hemijska analiza; rendgen difrakciona analiza, DTA, TGA, SEM.
2. Sastav minerala	Analiza elektronskom mikroskopom (XRD), ili detaljna hemijska analiza monomineralnih frakcija.
3. Zastupljenost i odnos minerala	Izdvajanje minerala po frakcijama; mikrometerska merenja: tačkasta, linijska i površinska.
4. Raspodjela elemenata	Racionalna analiza na osnovu podataka tačaka 2 i 3.
5. Krupnoća zrna minerala	Oslobađanje minerala ili agregata kristala hemijskim rastvaranjem (luženjem), praćeno sitovnom analizom; analizatorom slike.
6. Osobine minerala	Utvrditi eksperimentalno individualno za svaku sirovinu.
7. Strukturne karakteristike	Analiza slika (stereobinokularni mikroskop, rudni mikroskop, elektronski, konfokalni itd.) sirovine i minerala.
8. Granulometrijski sastav	Prosejavanja, odnosno sedimentacija sirovine, elutriacija i dr.
9. Forme i oblici zrna	Analiza slika
10. Sastav mineralnih zrna	Laboratorijska ispitivanja mogućnosti izdvajanja pojedinih zrna ili analiza slika
11. Strukture mineralnih zrna	Analiza slika

Tablica 4.3 Mineraloškim izučavanjem sirovine mogu se dobiti sledeći podaci:

1. Kvalitativni mineraloški podaci, odnosno sastav sirovine, sa posebnim osvrtom na:
♦ korisne rudne minerale ♦ korisne nemetalne (silikatne) minerale ♦ nepoželjne i štetne rudne minerale ♦ minerale jalovine.
2. Osobine minerala i sirovine
♦ gustina ♦ rastvorljivost ♦ radioaktivnost ♦ magnetske osobine ♦ osobine usitnjavanja (cepljivost, bliznjenje, korozivne osobine ili alteracija, kao što je sericitizacija, propilitizacija, zaglinjenost, oksidacija minerala itd.) ♦ stadijumi oksidacije ♦ prisustvo nepoželjnih minerala (nosioci P, S, As u rudama gvožđa, Bi u rudama olova itd.) ♦ hemijski sastav minerala sa posebnim osvrtom na izomorfizam (minerali u čvrstim rastvorima, Fe u marmatitu, Ag u tetraedritu itd.)
Na osnovu gore pobrajanih izučavanja i dobijenih podataka može se predložiti najbolji način postupaka PMS. Promene sastava sirovine, koje se mogu očekivati u okolorudnim stena- ma, ili pojedinim zonama (zona oksidacije, zona cementacije, zona izlučivanja) ili promene sastava sa dubinom koje mogu uticati na postupke usitnjavanja kako eksploatacija bude na- predovala.
3. Strukturno-teksturne karakteristike ili geometrijska karakterizacija sirovine i minerala
♦ metalnih rudnih minerala ♦ nemetalnih rudnih minerala ♦ nerudnih minerala

♦ minerala jalovine
sa posebnim osvrtom na tipove srastanja (uključujući tu i po- datke kao što su oksidacija, presvlačenje, prozivanje) poroz- nost i dr.
4. Kvantitativni mineraloški podaci
♦ sadržaj metalnih rudnih minerala ♦ sadržaj nemetalnih rudnih minerala ♦ sadržaj nerudnih minerala ♦ sadržaj minerala jalovine
uz kvantitativne i kvalitativne podatke kao i strukturno-tekstu- rne, odnosno geometrijske karakteristike imamo i sledeće
♦ relativna krupnoća zrna (agregata kristala) i krup- noća zrna usitnjene sirovine ♦ stepen oslobođenosti ♦ prosečni udeo minerala u srastim zrnima-sraslacima ♦ sadržaj metala u sirovini ♦ hemijska analiza uzoraka (proizvoda koncentraci- je-koncentrat, međuprodukt, jalovina pa i ulaz- na ruda) dobijeni ili izračunati na osnovu podata- ka mikroskopskih ispitivanja.

4.1.4 ANALIZE MODALNOG SASTAVA PRI REŠAVANJU ZADATAKA U PROCESIMA KONCENTRACIJE

Podaci dobijeni metodama i različitim tehnikama mineraloških analiza (modalna analiza) mogu biti, prema cilju koji se želi postići, osnova i koriste se kod prognoznih i istraživačkih ispitivanja.

① **Prognozna ispitivanja** podrazumevaju izučavanja stenskog materijala (matične rude) primarno prikupljenih mineralizovanih uzoraka sirovine, najčešće dobijenih iz jezgra bušotina (ili drugih tipova uzoraka prikupljenih na samom ležištu), kako bi se sagledale mineraloške karakteristike buduće sirovine. Ovakva ispitivanja pružaju niz korisnih informacija o neophodnim parametrima za sam postupak koncentracije, projektovanje

postrojenja za PMS, kao i niz informacija (potrebnih inženjeru PMS) pre nego što se bilo kakvi laboratorijski opiti koncentracije i započnu.

Rezultati rada (procesnog mineraloga), na prognostičkim karakteristikama, služe kako bi se utvrdilo: čitav niz uslova tehnološkog tretmana sirovine; utvrdili očekivani rezultati odnosno efekti koncentracije i kako bi se plan programa rada opita laboratorijskih ispitivanja usmerio u određenom pravcu.

② Nasuprot toga, istraživački rad se obavlja na nizu (zbirnih ili kolektivnih odnosno kompozitivnih) uzoraka prikupljenih u industrijskom postrojenju iz različitih faza tretmana (usitnjavanje, klasiranje, prečišćavanje, domeljavanje, koncentracija i dr.). Povezivanjem podataka modalne analize dobijenih sa svih snimljenih tačaka, po postojećoj šemi koncentracije, ponašanje svih praćenih minerala po vrstama i po klasama krupnoće, može biti na ovaj način praćeno prikazivanjem kroz bilanse minerala – projektovane tehnološke šeme koncentracije.

Na ovaj način, uočene poteškoće uzrokovane tehnološkom šemom, mogu biti lako identifikovane te se mogu odmah preduzeti odgovarajuće korekcije. Postupci korekcije podrazumevaju promene parametara (pri tretmanu sirovine), izmenu postojeće opreme (mašina i uređaja), ili instaliranje nove opreme. Laboratorijski opiti zatvorenog ciklusa flotiranja se koriste kod simulacije i razrade čitavog niza, različitih opcija tretmana (promena uslova) planiranih sa ciljem rešavanja utvrđenih problema.

4.1.5 PROGNOZNA MODALNA ISPITIVANJA

Prognostična modalna ispitivanja se sprovode na kompozitivnim uzorcima – prikupljenim iz istražnih radova na samom ležištu, a koji prezentuju i predstavljaju kvalitet buduće sirovine. Sirovina se usitnjava (drobi i melje) do određene finoće (nominalni prosej sita) zatim se klasira po uskim klasama i nakon određene obrade, izrađuju se rudni preparati – briketi (mineralna zrna se zalivaju poliesterskim smolama). Na poliranim površinama preparata se, nakon izvršene determinacije, utvrđuje raspodela prisutnih minerala po vrstama i klasama krupnoće standardnim metodama modalne mineraloške analize.

Na osnovu podataka modalnog sastava sirovine može se izvesti sledeće:

□ Utvrđuje se optimalna finoća mlevenja koja će osigurati adekvatnu oslobođenost ključnih minerala, kako od minerala jalovine, tako i od drugih nepoželjnih minerala.

□ Potreba za domeljavanjem može biti rešena, kao i verovatno mesto vraćanja (domlevene i klasirane) pulpe (određene finoće) u ciklusu mlevenja. Isti podaci mogu poslužiti i pri određivanju broja prečišćavanja neophodnih da bi se postigao odgovarajući – ciljni kvalitet koncentrata.

□ Upoređujući odnose praćenih minerala, prisutnih u datom polaznom uzorku (ulazna sirovina) sa drugim uzorcima, proizvodima PMS iz procesa, može se predložiti i postaviti, u glavnim crtama, opšta šema reagensnog režima.

□ Osobine i ponašanje rude mogu se prognozirati (zavisno od vrste minerala) prikazivanjem funkcijom

sadržaj–iskorišćenje za svaki mineral i odgovarajući ciklus (metala) koncentracije u tehnološkoj šemi koncentracije poliminerale sirovine.

Prema tome već samo jedan laboratorijski opit meljivosti uzorka sirovine, sa analizom modalnog sastava, omogućava određivanje ključnih parametara tretmana, indicira opšti tok šeme tehnološkog procesa i pruža podatke o graničnim vrednostima u pogledu na mineraloške osobine.

4.1.6 ISTRAŽIVAČKA MODALNA ISPITIVANJA

Istraživačka ispitivanja modalnog sastava (a obuhvataju operativno–kontrolna, eksperimentalna i naučno–istraživačka) se sprovode na grupama (kompozitivni uzorci) ili nizu uzoraka samlevene sirovine – pulpe. Ovi uzorci mogu biti prikupljeni iz faze usitnjavanja ili iz nekog dela industrijskog procesa odnosno neke faze ili su to sistematski uzorci snimanja celokupnog pogona. Uzorci se obrađuju po standardnoj šemi obrade pulpe, usko klasiraju, a od svake klase krupnoće izrađuju se rudni preparati i određuje raspodela minerala po vrstama i po krupnoći (prave se bilansi minerala). Koristeći podatke bilansa masa i obračun na celokupno sprovedeno uzorkovanje, pokazatelji (performanse) flotiranja svih vrsta mineralnih zrna u bilo kom rasponu krupnoće, mogu biti praćeni (i mereni).

Tipična istraživačka ispitivanja modalnog sastava koriste se na sledeći način:

□ Uzorci prikupljeni po određenim pravilima i na određenim tačkama šeme višestepenog usitnjavanja otkriće kako se menja stepen oslobođenosti zavisno od potrošnje energije. Ovaj tip ispitivanja takođe omogućuje uvid u vrlo korisne podatke o prirodi kretanja masa (kapacitetu, opterećenju itd.).

□ Uzorci koncentrata, sukcesivno prikupljenih duž niza flotacijskih ćelija (jedna za drugom) omogućuju sagledavanje i ocenu kinetike flotacije ključnih mineralnih vrsta. Ovaj tip podataka se koristi pri rutinskoj oceni potrebe za većim kapacitetom ili dodatnim ćelijama, u stadijumu flotacije. Ispitivanja modalnog sastava pulpe na nizu flotacijskih ćelija takođe predstavljaju pogodan postupak razrade performansi mehanizama različitih flotacijskih ćelija. Ovi postupci mogu se takođe koristiti pri određivanju efekata novog reagensnog režima.

□ Uzorci prikupljeni na liniji ciklusa domeljavanja mogu biti analizirani pri određivanju – koliko stadijum domeljavanja stvarno doprinosi povećanju oslobođenosti datog ciljnog minerala.

□ Sistematsko uzorkovanje u ciklusu prečišćavanja pruža kritične podatke o ponašanju zrna i čestica minerala zavisno od raspona krupnoće. Zahtev za višestrukim izvođenjem prečišćavanja lako može biti procenjen, kao i prednosti postupka otvorenog ciklusa prečišćavanja mogu biti snimljene (i određene). Poređenje performansi konvencionalne flotacijske ćelije i flotacije u kolonama, koristeći se postupcima modalne analize, je področje od posebnog interesa u pogonima koji poseduju oba uređaja (mašine).

□ Izučavanja modalnog sastava najčešće se vrše na svim proizvodima koncentracije (izlaznim tokovima iz industrijskog postrojenja za PMS). Ovakava ispitivanja, analize modalnog sastava, sprovedena u industrijskom

postrojenju, su najkorisnija pri upoređivanju i razjašnjavanju (razloga) razlika za period kada se pokazatelji mineralnog sastava menjaju. Mesečni uzorci ili, za neki drugi vremenski period prikupljeni, kompozitni uzorci proizvoda koncentracije iz industrijskog postrojenja se koriste za ovaj tip istraživanja.

□ Modalne analize sprovedene na pulpi otoka jalo-vine iz postrojenja, otkriće identitete i karakteristike mineralnih vrsta odgovornih za gubitke metala.

Istraživačka ispitivanja modalnog sastava sprovede-na na serijama uzoraka iz industrijskog postrojenja, pru-žaju suštinske informacije, o ponašanju svakog minerala i po svim klasama krupnoće. Ovakvi podaci tada mogu biti korišćeni kao pokazatelji za moguće izmene tretma-na u tehnološkoj šemi. Često se podaci izučavanja mo-dalnog sastava prvenstveno koriste pri izboru početnih vrednosti promenljivih za proučavanja u ciklusu simu-lacija koje predhode izmenama u šemi na samom pogo-nu.

Šematski prikaz mineraloških ispitivanja proizvoda pripreme mineralnih sirovina prikupljenih u pogonu ili laboratoriji dat je na slici 4.1.

4.1.7 KARAKTERIZACIJA MINERALNE SIROVINE UZ POMOĆ ANALIZATORA SLIKE

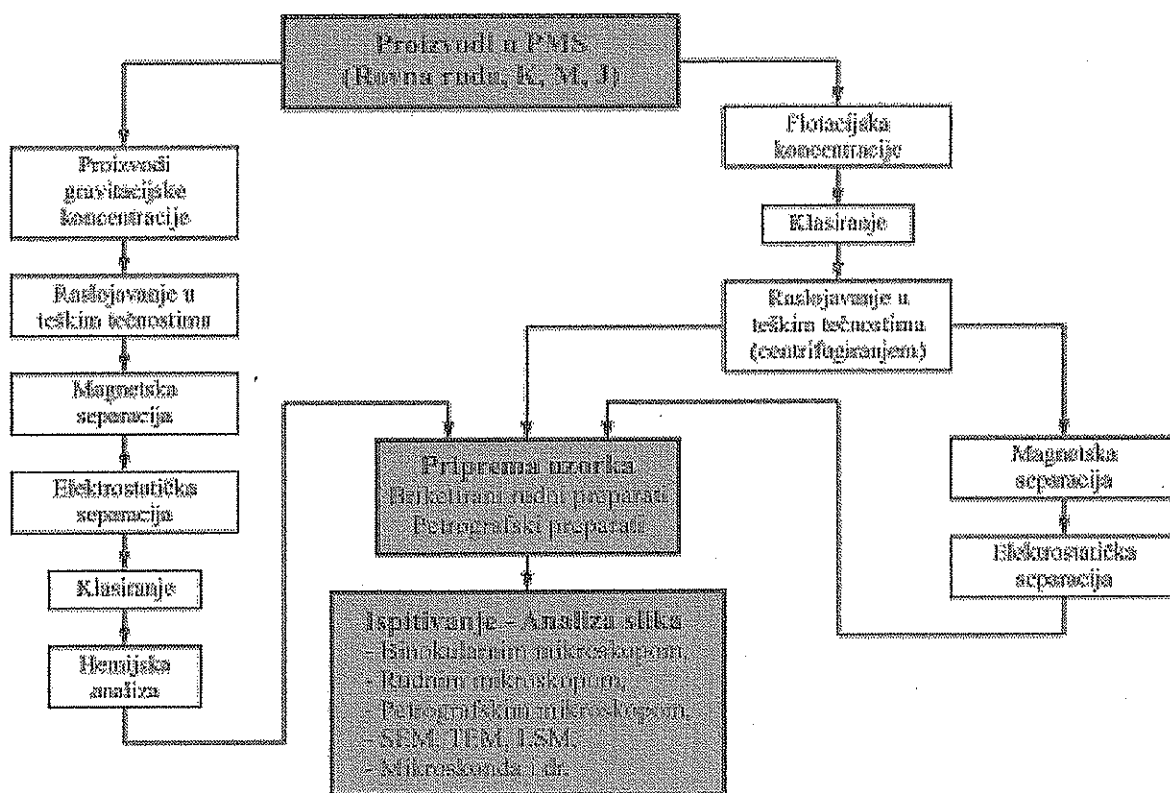
Stručnjaci pripreme mineralnih sirovina koji su vezani za tehnologiju i procese rada industrijskih postrojenja, kao i istraživačima u laboratoriji, *poznavanje karakteri-stika mineralne sirovine i karakterizacija proizvoda kon-centracije je od primarnog značaja pri osmišljavanju strategije njene kompleksne valorizacije.*

Drugim rečima sasvim je jasno, da svima onima koji su vezani za tehnologiju mineralnih sirovina, mora biti na raspolaganju veliki broj kvantitativnih podataka o mineralima iz sirovine, za čiju su tehnologiju vezani u što je moguće kraćem vremenu, kako bi se proces mo-gao uspešno pratiti, automatski kontrolisati i moglo upravljati njime. Vrednosti kvantitativnih podataka o mineralima u sirovini, počev od stadijuma projektova-nja pa sve do potpunog uhodavanja kao i u toku samoga rada postrojenja za pripremu mineralnih sirovina su od izuzetne važnosti stručnjacima PMS.

U radu sa mikroskopom, vidna polja ili slike mine-rala, odnosno preseki komada rude, predstavljaju naše "uzorke" (površine poliranih rudnih preparata mineralne sirovine ili briketi proizvoda koncentracije).

Svi neophodni elementi, potrebni da bi se izvršila zahtevana karakterizacija sirovine, mogu se dobiti iz analize slika i na odgovarajući način transformisati u numeričke (digitalne) podatke pogodne za određenu ob-radu i korišćenje.

Uvođenjem potpuno automatakih sistema - analiza-tora slika (IPAS - Image Processing and Analysing Sys-tem) koje čine osnovne celine Mikroskop - TV kamera - Računar - Analizator slike, a koji, s jedne strane, oslo-bađaju čoveka dugotrajnog i jednoličnog prikupljanja potrebnih podataka, a sa druge strane biće više vremena i omogućeni uslovi za kreativan rad, koristeće se njego-va veština i stečeno iskustvo u prikupljanju i obradi ve-likog broja, tačnih podataka, odgovarajuće analiziranih, koje takvi sistemi pružaju.



Sl.4.1 Šema mineraloških ispitivanja proizvoda pripreme mineralnih sirovina

Na slici 4.2. prikazan je blok-dijagram rada jednog sklopa Mikroskop - TV kamera - Računar - Analizator slike (odgovarajući softverski paket), sa mogućim alternativnim elementima, širokog spektra opremljenosti i radnog konfora. Slike, na odgovarajući način pripremljenih površina rudnih preparata, se automatski memorišu, i na njima se vrše merenja koja su potpuno analogna onima koja se sprovode kod konvencionalnih postupaka mikrometrijske analize.

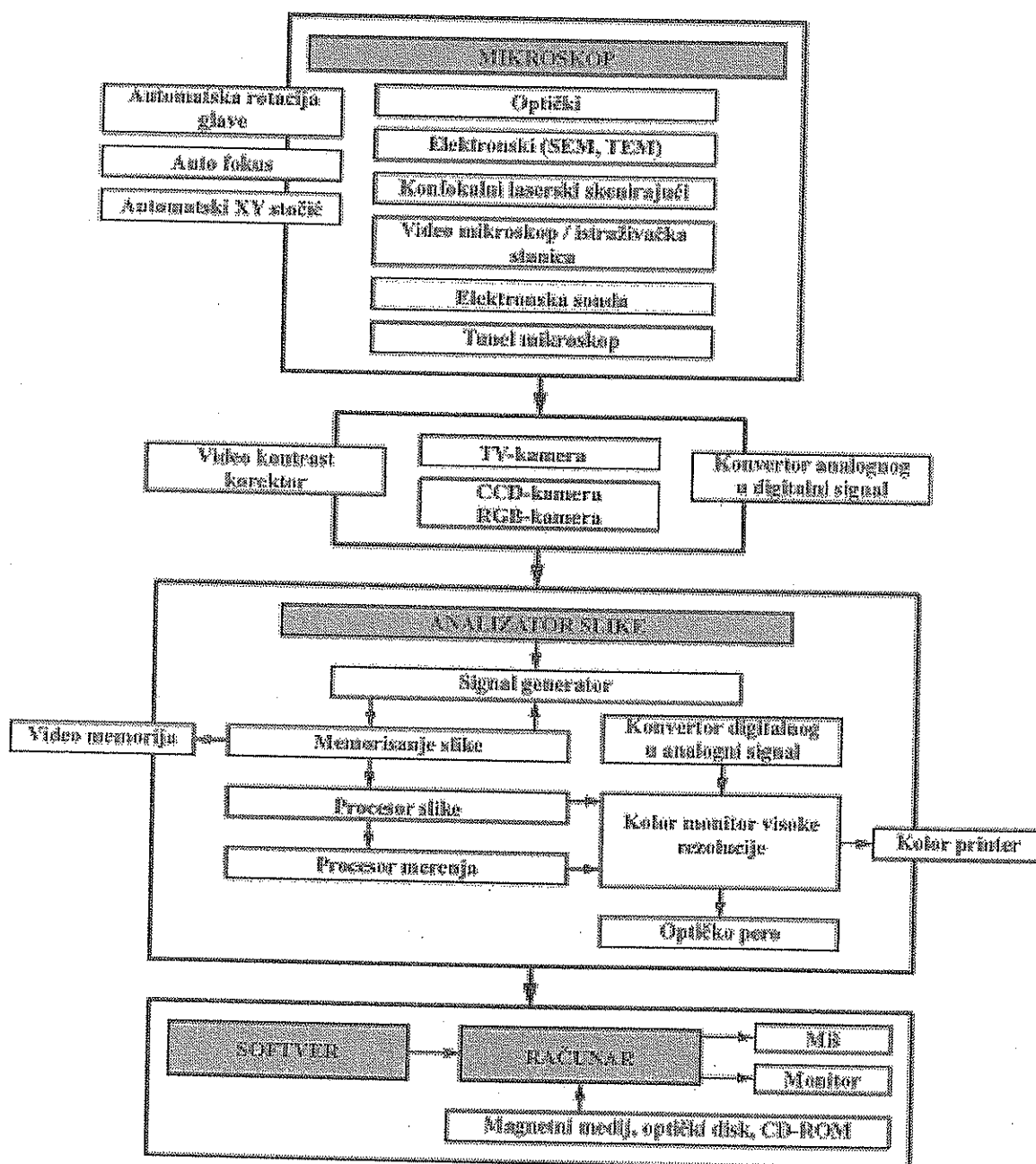
Koji su sve podaci potrebni procesnom mineralogu, odnosno inženjeru pripreme sirovina razmotreni su u tablici 4.2 odnosno 4.3, koje sve podatke pružaju sami automatski sistemi mikrometrijskih analiza?

• Distribuciju učestalosti merenih odsečaka, distribuciju prečnika zrna ili čestica, klasiranje podataka, podatke o granulometrijskom sastavu (učestalost najkrupnijih i najsitnijih zrna, srednji prečnik, krupnoću i udele poje-

dinih faza u sraslim zrnima, Martin-ovi ili Feret-ovi prečnici i niz drugih podataka vezanih za primarne uzorke ili fragmentiranu mineralnu sirovinu);

- Gustinu zrna po jedinici zapremine;
- Morfometrijska analiza (sa mogućnošću prepoznavanja oblika);
- Faznu analizu i međusobne odnose tih faza;
- Oslobodenost minerala i tipove srastanja;
- Indeks sraslosti, indekse kontigviteta;
- Specifične slobodne površine (promene, rast);
- Gustine fraktura;
- Gustine intergranularnih površina, rastojanja i dr.

Ova nova tehnika merenja isključuje subjektivnost i moguću neadekvatnu determinaciju ili grešku raspoznavanja sličnih minerala, a istovremeno stečene veštine, operativnost i uopšte rad sa optičkim mikroskopom će biti i dalje u potpunosti iskorišćeni.



Sl.4.2 Dijagram rada sistema MIKROSKOP - TV KAMERA - RAČUNAR - ANALIZATOR SLIKE

Konvencionalni metodi analiza su se pokazali, premda tačni, ali kao vrlo spori da bi mogli biti od značajne koristi za mnoge aplikacije u PMS. Nisu retki slučajevi da se istraživanja na nekim projektima završavaju a mineraloška karakterizacija sirovine, sa prognozama njenog ponašanja i očekivanim kvalitetima u toku tehnološkog tretmana, se tek privodi kraju a po pravilu je trebala biti osnova inženjeru PMS u procesu izbora optimalne tehnološke šeme prerade. Metode analizatora slike su te koje su u mogućnosti da alternativno ponude ogroman broj vrlo tačnih podataka u veoma kratkom vremenu.

4.1.8 RAZVOJ SISTEMA ANALIZE SLIKA

Već od najranijih vremena geolozi i mineralozi, aplikativne rudne mikroskopije, su bili zainteresovani za geometrizaciju elemenata stena i minerala za obeležja kao što su dimenzije, oblik, zastupljenost i međusobne odnose minerala u rudi ili za - oblik, dimenzije, sastav, odnos faza i strukturu mineralnih zrna, stepen oslobođenosti fragmentirane-usitnjene sirovine ili drugih proizvoda PMS.

Ovakve informacije imaju za cilj:

- da se upotpuni naše saznanje o poreklu, nastanku i prirodi izučavane rude,
- da se sagleda optimalna tehnološka šema prerade, podrazumevajući prognozno određivanje finoće mlevenja za optimalne oslobođenosti datih minerala,
- da se sagledaju mogućnosti sprovođenja tih operacija i da se izvrši snimanje oslobađanja pri različitim finoćama mlevenja,
- da se sagleda mogućnost dobijanja proizvoda određenih kvaliteta - koncentrata minerala, delovanjem odgovarajućih reagenasa,
- projektovanje i proizvodnju materijala - supstituta minerala (npr. keramički materijali) sa unapred određenim fizičkim osobinama i tome slično.

Svi savremeni sistemi analizatora slike obrađuju dvodimenzione slike koje se dobijaju snimanjem poliranih

površina trodimenzionalnih rudnih preparata. Slike se mogu formirati:

- mikro i makro posmatranjem uz pomoć lupe, stereo-binokularnog mikroskopa, fotografisanjem
- uz pomoć optičkog rudnog ili petrografskog mikroskopa
- uz pomoć elektronskog mikroskopa
- uz pomoć elektronske mikroskopske (različiti tipovi) i na kraju
- uz pomoć televizijske kamere.

U tabeli 4.4 prikazan je uporedni pregled sistema analizatora slika, razvrstanih prema nizu relevantnih kriterijuma, i mogućnostima koje pružaju tokom mikrometrijskih analiza preparata, uključujući tu i oslobađanje minerala. Na slikama, odgovarajuće pripremljene površine rudnih preparata, se zatim automatski vrše merenja postupcima koji su upravo analogni onima koja se vrše konvencionalnim analizama na sličnim objektima. Prema tome, idealnim sistemima analizatora slike mogu se sprovesti analize planimetrijskim metodama, linijskim metodama, tačkastim metodama kao i postupcima pogodnim za zrnasti materijal. Takođe je moguće vršiti sasvim precizna merenja i dobiti podatke o svim mineralnim fazama sadržanih u specimenu istovremeno i to u vrlo kratkom vremenu.

Svakako da i konvencionalni postupci analiza slika mogu biti primenjivani za dobijanje određenih podataka, međutim ovim postupcima se tada mora posvetiti posebna pažnja uz učešće eksperata aplikativne rudne mikroskopije ili bar iskusnog geologa - mineraloga. Ovakva ispitivanja su, prema tome, veoma spora i skupa. Samim tim, jasno je da osnovni principi koji se koriste u metodama konvencionalnih analiza slika mogu biti korišćeni (zapravo oni im predhode) uz određena prilagođavanja, kod brzih i savremenih automatskih sistema.

Tablica 4.4 Komparativni pregled sistema analizatora slike sa kriterijumima upoređivanja

Kriterijumi	Sistem merenja				
	Automatski			Poluautomatski	Konvencionalni
	Automatski površine	Automatski linije (tačke)			
1. Karakteristika tipičnog sistema	TV-skenirajući sistem TV-skanner	denzitometar	lokalni mikroanalizator	planimetar	mehanički mikrometri i sl. (tačke, linije, površine)
	Porodica Quantimet 520, 720, 920. MAGISCAN 2AR OMNICON 3600 OPTOMAX V STEREOSCAM 240	IBAS II - Zeiss ORTOLUX + M.P.V. fotometar Kontron	QEM-SEM sistem CAMEBAX-micro CAMECA SR 50	MOP sistem Light-pen MAGISCAN 2A	Point counter Mikrometar ANDINA Mikrometar Schand-a i Rosiwal-a
2. Vrsta signala	optička iluminacija	iluminacija elektronskim snopom	X-zraci odnosno elektronski snop	optički	optički
3. Priprema uzorka	sa zahtevima	sa zahtevima	neznatni zahtevi	neznatni zahtevi	uobičajeni zahtevi
4. Pregled specimena	u vazduhu	u vazduhu	u vakuumu	u vazduhu	u vazduhu ili ulju
5. Lakoća determinacije minerala	prilična	dobra	vrlo dobra	izvrsna	izvrsna (zavisno od veličine)
6. Brzina analize	vrlo brza oko 1 μs/polju	brza 1-10 μs/observaciji	sporija 10 μs/observaciji	vrlo spora 1 s/observaciji	izuzetno spora
7. Stereološke mogućnosti	O-D, 1-D, 2-D	O-D, 1-D	O-D, 1-D	1-D, 2-D	O-D, 1-D, 2-D
8. Stereološka transformacija	nije uvek pogodna za 2-D osmatranja	više je pogodna za 1-D	načesto je pogodna za 1-D merenja	nije uvek pogodna	pogodna
9. Priroda materije koja treba da se meri	jednostavna: optičko lako razlikovanje	optičko razlikovanje nešto teže	optičko razlikovanje teško ili nemoguće	za složene materijale: razlikovanje vrlo teško	optičko razlikovanje-subjektivno
10. Cena po uzorku	mala	visoka	prilično visoka	visoka	relativno niska

4.1.9 AUTOMATSKI ANALIZATOR SLIKE

Polirane površine rudnih preparata čine čitav niz agregata paragenetske asocijacije minerala koji imaju vrlo specifične hemijske, fizičke i morfološke karakteristike. Pored toga, neophodno je imati u vidu i različite diskontinuitete (mikroprslina, pukotine, inkluzije, produkte alteracije i dr.) za koje su karakteristična posebna obeležja vezana za različitu tipologiju, orijentaciju, forme i drugo.

Da bi se rešio postupak automatske kvantifikacije, i prevođenja u numeričke podatke, pri rešavanju izbora mogućnosti valorizacije sirovine, a uzimajući u obzir pomenutu karakterizaciju sirovine, neophodno je raspolagati sledećim:

- jednom integralnom hardverskom i softverskom konfiguracijom, koja će biti u mogućnosti da podrži sve neophodne analitičke postupke, da se na osnovu uzoraka slika mogu izdvajati podaci korisni za izvršenje unapred definisanih klasifikacija, analiza ili modeliranja na datoj sirovini;
- da imamo tako razrađene strukture algoritama koji će biti u mogućnosti da komuniciraju između strukturno-teksturnih i drugih karakteristika sirovine i rezultata ostvarenih u industrijskim procesima PMS (finoća mlevenja, klasiranje, iskorišćenja odnosno gubici, ekonomisanje energijom i dr.).

Ekspert sistemi koji koriste tehnike "razumnog odlučivanja" i objedinjuju širok spektar saznanja o mineralima i mineralnim sirovinama kao i principima njihovih klasifikacija, mogu sa lakoćom dati karakterizaciju neke date sirovine na osnovu digitalnih slika.

Mogućnost da se obrađuju različiti mineraloški i petrografski podaci, sa specijalnim mikrometrijskim merenjima i klasifikacijama određenih karakteristika, analiziranih uzoraka mineralne sirovine, a sve to u formi numeričkih podataka, predstavljaju vrlo koristan postupak determinacije, kontrole ili verifikacije niza parametara koji utiču na rezultate jedne kompleksne valorizacije mineralne sirovine.

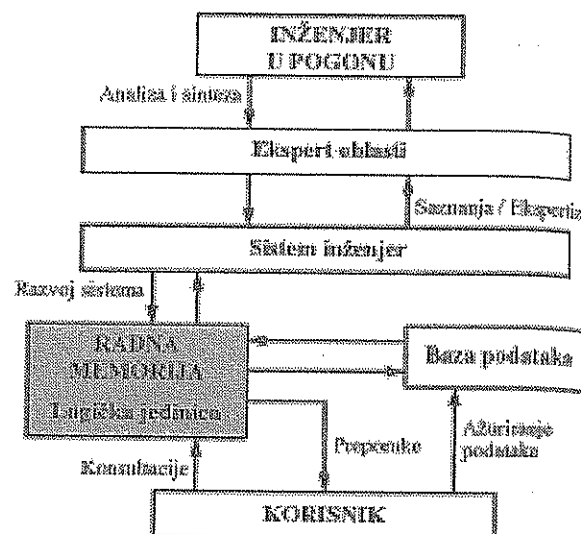
Dijagram "klasične šeme" ekspertnog sistema ilustruje funkcionisanje "sistema baza saznanja" prikupljenih od ljudi eksperata iz određenih oblasti. Koristeći se ovakvim prikazom, saznanja iz različitih područja mogu biti integrisana, tako da vrlo retke i, svakako, skupe ekspertize mogu biti na ovaj način široko korišćene. Šema funkcionisanja jednog konvencionalnog ekspertnog sistema i odgovarajuće baze podataka data je na slici 4.3.

Polirana površina svakog preparata date sirovine (u ovom slučaju uzorci slika) može se na ovaj način razmatrati kao neprekidni niz subpovršina (oblasti) međusobno povezanih, tako da je svaki od njih određen granicama (profilima) i odgovarajućim hromatskim funkcijama uz pomoć kojih je moguće odrediti obojenost svake od njih.

Sukcesivnost operacija koje se izvode u postupku analize slika pri bilo kom načinu identifikacije i merenja može se prikazati sledećom šemom:

□ **SNIMANJE SPECIMENA** – mikroskopskog preparata, duž određenih profila ili po mreži i stvaranje serije slika određenog uvećanja i kvaliteta;

□ **FORMIRANJE SLIKA** – pretvaranje analognih u digitalne signale (učitavanje i upis na disk; izdvajanje dela slike-prozora, za obradu; isecanje i povezivanje delova slike; izračunavanje histograma refleksije);



Sl.4.3 Šema funkcionisanja konvencionalnog ekspertnog sistema i odgovarajuće baze podataka (baze saznanja).

□ **POBOLJŠANJE (POJAČAVANJE) KVALITETA SLIKE** - elektronske slike TV-kamere prilagoditi budućim analizama (digitalno filtriranje; korekcija kontura; poboljšanje kontrasta; segmentacija pomoću praga refleksije; operacije nad binarizovanom slikom-korekcija senčenja, Boolean-ove operacije, erozija, dilatacija);

□ **DETEKCIJA** - detekcija i identifikacija detalja za analizu sa specifičnim obradama slike (interaktivno definisanje karakterističnih oblika; automatsko prepoznavanje oblika; automatsko određivanje parametara oblika, projekcije, orijentacije, površine, obima, sferičnosti, centroida itd.; automatska klasifikacija objekata preko oblika, dimenzija, sjajnosti, boje, morfologije i dr.);

□ **BINARNA MODIFIKACIJA SLIKA** - fine modifikacije slika neophodne za precizna merenja;

□ **MERENJA** na uzorcima slika (prečnika, površina, gustine kontakata, oslobođenosti i sl.);

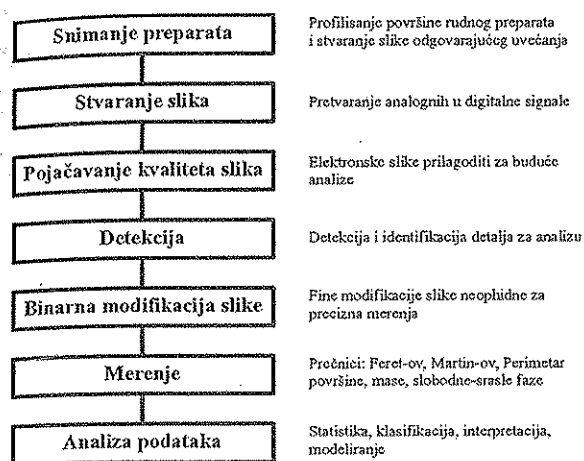
□ **ANALIZA PODATAKA** – statističke analize (prebrojavanje objekata, klasifikacija objekata po pojedinim parametrima; integralna klasifikacija rezultata obrade – po gustini, dimenzijama, površini, ekvivalentnom radijusu; pseudo kolor prikaz klasifikacije), klasifikacija, interpretacija, modeliranje.

Dijagram sukcesivnosti operacija kod rada analizatora slike, bilo koje alternativne varijante, prikazan je na slici 4.4.

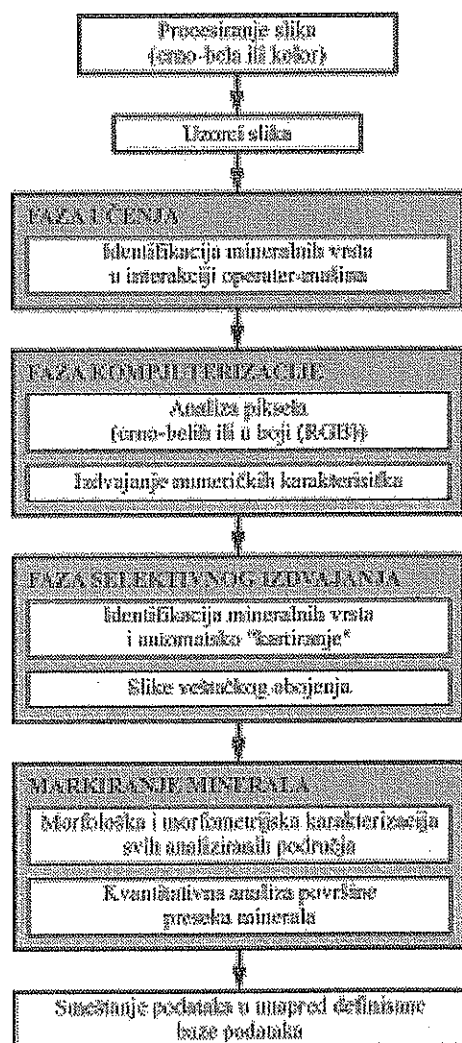
Na ovakvim uzorcima slika je moguće izdvajati različite subpovršine (domene) i na osnovu hromatske funkcije ih tačno mineraloški definisati i opisati, i time u stvari izvršiti karakterizaciju same sirovine na osnovu slika sa različitih mesta, sa različitim granicama i različitim položajima tih slika unutar samog uzorka.

Podaci koje mogu da pruže uzorci slika, a interesantni su sa aspekta modeliranja i simulacije, direktno mo-

gu biti korišćeni, kao ulazni podaci, za razradu algoritma sledećih faza analize slika. Na ovom stadijumu izučavanja, osnovni cilj analize predstavljaju identifikacija različitih, numerički definisanih, mineraloških vrsta i utvrđivanje njihove raspodele (Sl.4.5).



Sl.4.4 Sukcesivnost operacija dobijanja slika za analizu



Sl.4.5 Dijagram toka operacija pri dobijanju podataka o sirovini

Izbor procedure određivanja postupaka opisa ili postupaka identifikacije svake mineralne vrste, vezan je za karakteristike slike (makro ili mikro uzorka) odnosno za sistem akvizicije slike (cno-bela ili kolor) ili za postupak uzorkovanja prilagođenog načinu memorisanja slika (pojedinačno ili u nizu).

Rezultat ovako razrađenog postupka je "karta minerala", koja predstavlja jednu relativno uprošćenu sliku strukturnih odnosa minerala, koja pokazuje morfološke karakteristike tih minerala, a sve sa ciljem da bi se lakše mogla sprovesti mikrometrijska merenja i odgovarajuće analize.

Savremenim analizatorima slike, bez obzira na sistem merenja, danas je moguće za relativno kratko vreme dobiti čitav niz podataka o sirovini od kojih ranije neke uopšte nije ni bilo moguće dobiti. Razvoj i primena novih sistema danas nalazi sve širu primenu kako u istraživačkim, laboratorijskim uslovima tako i u pilot postrojenjima i industrijskim pogonima. Analiza slika kao i prateći softverski programi uslovljeni su primenom različitih instrumentalnih tehnika dobijanja slike.

4.1.10 KVANTIFIKACIJA VIZUELNIH INFORMACIJA UZ POMOĆ ANALIZATORA SLIKE

Automatska kontrola i upravljanje u industrijskim procesima PMS, neizostavno podrazumeva karakterizaciju mineralne sirovine odnosno minerala, jer njenim poznavanjem u svakoj fazi tehnološkog procesa i za sve proizvode koncentracije moguće je efikasno voditi proces. Ovakve analize se danas mogu vršiti u relativno kratkom vremenu (u toku jedne smene, dana) te je reč o monitoringu čiji rezultati imaju presudan uticaj na upravljanje procesom i razradu najpovoljnije strategije kompleksne valorizacije mineralne sirovine.

Zahvaljujući izradi brzih procesora kao i veliko povećanje memorijskih resursa računarskih sistema, analiza i obrada slika postala je moguća i na malim personalnim računarima. Ta činjenica je bila osnova razvoja sistema za obradu i analizu slike različitih proizvođača. Sistemi se razvijaju sa idejom da svaka istraživačka laboratorija ili odeljenje za kontrolu kvaliteta poseduju računar (PC) i relevantan izvor slike (optički mikroskop, elektronski mikroskop, rendgen, skener, video kamera, rekordere, termovizijske kamere i sl.) kako bi mogli da koriste ovakve programske pakete.

Razvijeni sistemi analizatora slike predstavljaju praktično programsku nadgradnju postojeće opreme, zavisno od hardverskih komponenata koje su posebno razvijene, za razliku od starijih sistema, koji predstavljaju zatvorene sisteme. Osnovu samog sistema u osnovi čini programski paket koji je potpuno modularan. Modularna koncepcija sistema se sastoji iz četiri glavna modula. Bazira se na radu u Windows okruženju. Moduli programskog paketa su: akvizicija slike, obrada slike, merenja, analiza i izveštaji.

MODUL AKVIZICIJA ima zadatak formiranja slike, sa bilo kog aktivnog izvora, arhiviranje slike u standardnim grafičkim formatima. Značajan segment ovoga modula je deo za pripremu slike za kasnije operacije obrade i merenja (ovaj modul vezan je za deo koji se koristi za digitalizaciju slike). Modul omogućava snimanje pojedinačnih i slika u nizu (filmova). Kao segment

modula tu je i niz opcija za formiranje vizuelnih banki podataka sa pratećim podacima o slikama i opcijama pretrage. Kreirane baze podataka se mogu koristiti nezavisno, za odgovarajuće prezentacije, ili vizuelna podrška dobijenim rezultatima analize ispitivanog materijala.

MODUL ZA OBRADU ARHIVIRANIH SLIKA.

Ovaj modul programskog paketa se koristi za obradu odnosno pripremu slike za merenja. Specifične transformacije su binarizacija, erozija, dilatacija, zatvaranje kontura odnosno sve operacije koje imaju za cilj jasno izdvajanje objekata za kasnija merenja. Modul omogućava i editovanje same slike, pisanje komentara ili markiranje objekata.

MODUL MERENJA predstavlja ključni deo programskog paketa. Merenja se mogu vršiti korišćenjem piksela kao osnovne merene jedinice ili kalibracijom dobijene slike. Razlikuju se globalna merenja - svih objekata na slici, i individualna merenja, odnosno merenja na svakom pojedinačnom objektu. Merenja obuhvataju sve parametre morfološke analize, dimenzija, faktora oblika, veličina projekcija, obima, površine, fraktalnih dimenzija i dr. Deo ovog modula je i brojanje objekata prema unapred zadatim faktorima (veličini, površini, obimu). Tu je i deo prepoznavanja oblika i njihovo poređenje sa postojećim objektima u banci oblika. Merenja mogu da se vrše manuelno, poluautomatski i automatski. Deo ove celine je i denzitometrija koja ima za funkciju merenje intenziteta osvetljenosti pojedinih delova na slici, što može dobro poslužiti pri identifikaciji minerala prema količini reflektovane svetlosti.

MODUL ANALIZA dobijenih rezultata i generisanje adekvatnih izveštaja predstavlja četvrti deo ovoga paketa. Ovaj značajan modul obuhvata statističke metode, tabelarno i grafičko prikazivanje u različitim formama. Deo analize daje mogućnost za modelovanje dobijenih rezultata prema teorijskim i korisničkim modelima. Intreresantno je napomenuti da se svaki od pomenutih modula programskog paketa može koristiti kao zasebna programska celina.

Danas već široko razvijeni postupci, koji se nude na tržištu, trebalo bi da budu laki za povezivanje sa numeričkim programima simulacije, gde je modeliranje karakteristika mineralne sirovine jedan od osnovnih polaznih zadataka njene uspešne valorizacije.

Razumljiva i realistična karakterizacija mineralne sirovine odnosno njenih konstituenata - minerala, predstavlja osnovni uslov izbora postupaka jedne kompleksne valorizacije, odnosno praćenja i kontrole tehnološkog procesa po fazama, kao i osnovu odlučivanja pri regulaciji procesa (kao što su: definisanje šeme usitnjavanja i klasiranja, kvalitativno- kvantitativna analiza kod kretanja masa, postavljanje strategije kontrole procesa i dr).

4.1.11 RACIONALNA ANALIZA

Ovde se pod racionalnom analizom podrazumeva određivanje masene zastupljenosti minerala sadržanih u uzorku sirovine. Podaci o masenom udelu minerala dobijaju se računskim putem na osnovu podataka kompletne ili delimične hemijske analize i odgovarajućeg mineralnog sastava. Ako sadržaj jednog elementa ili jedinjenja, registrovan hemijskom analizom, potiče od dva ili više minerala, računskim putem nije moguće ustanoviti njihove masene udele, bez dopunskih ispitiva-

nja. Prvenstveno treba pokušati da se uzorak (njegov manji reprezentativni deo) rasloji na monomineralne frakcije (koristeći se pri tome razlikama u fizičkim, hemijskim, magnetskim, osobinama elektroprovodljivosti, flotabilnosti, rastvorljivosti ili nekim drugim osobinama) koje bi predstavljale masene udele datih minerala u ispitivanom uzorku. U slučajevima kada se iz uzorka ne mogu izdvojiti monomineralne frakcije, asocirajućih minerala, za izračunavanje masenih udela minerala ili odnosa njihove zastupljenosti, primenjuje se kvantitativno - mineraloška analiza.

✱ **Primer. Racionalna analiza 1.** Određivanje sadržaja minerala u nekoj sirovini je osnovni cilj racionalne analize, a koristi se podacima kvalitativnog sastava i podacima kvantitativnog mineralnog sastava.

Na bazi hemijskog sastava mineralne sirovine (ili proizvođa koncentracije) mogu se odrediti osnovni podaci o kvalitativnom (koji) i kvantitativnom (koliko) mineralnom sastavu date sirovine.

Pored hemijskog sastava sirovine, u određivanju sadržaja minerala mogu da budu od koristi i maseni udeli pojedinih frakcija (M. F., N. M. F., ΔL , ΔT) izdvojeni iz rude ili mikroskopski utvrđena zastupljenost odnosno međusobni odnosi pojedinih mineralnih vrsta (stereoskopskim binokularnim mikroskopom, rudnim polarizacionim mikroskopom ili analizatorom slike).

Masena zastupljenost minerala se određuje na bazi:

- hemijskog sastava mineralne sirovine;
- fazne analize - elektronska mikroskopska;
- mineraloške sastava sirovine;
- masenog udela pojedinih frakcija izdvojenih iz rude, i
- masenog udela minerala dobijenih integriranjem pojedinih mineralnih vrsta rudnim polarizacionim mikroskopom, analizatorom slike ili brojanjem zrna stereobinokularnim mikroskopom.

Postavka zadataka:

Polirani rudni preparat Pb-Zn-(Cu-Fe-As) rude ima sledeći mineralni sastav:

Galenit	PbS	(Pb=86,60%, S=13,40%)
Sfalerit	ZnS	(Zn=67,10%, S=32,90%)
Arsenopirit	FeAsS	(Fe=34,30%, As=46,00%, S=19,70%)
Halkopirit	CuFeS ₂	(Cu=34,60%, Fe=30,50%, S=34,90%)
Magnetit	Fe ₃ O ₄	(Fe=72,30%)
Hematit	Fe ₂ O ₃	(Fe=70,00%)
Pirit	FeS ₂	(Fe=46,50%, S=53,50%)
Limonit	Fe ₂ O ₃ · n H ₂ O	
Kalcit	CaCO ₃	(CaO=56,00%, CO ₂ =44,00%)
Kvarc	SiO ₂	

Mikroskopskim merenjima je dobijen podatak da uzorak sadrži 7% hematita. Propuštanjem reprezentativnog uzorka od 30 g kroz Devisov magnetski analizator izdvojena je magnetična frakcija od 2,7 g.

U kompletnej hemijskoj analizi dobijeni su sadržaji elemenata:

Pb = 4,01%	(PbS)	
Zn = 3,88%	(ZnS)	
Fe = 36,42%	(FeAsS; CuFeS ₂ ; Fe ₃ O ₄ ; Fe ₂ O ₃ ; FeS ₂ ; Fe ₂ O ₃ · n H ₂ O)	
S = 30,01%	(PbS; ZnS; FeAsS; CuFeS ₂ ; FeS ₂)	
As = 0,51%	(FeAsS)	100
Cu = 0,17%	(CuFeS ₂)	x %
CaO = 2,16%	(CaCO ₃)	100
SiO ₂ = 15,95%	(SiO ₂)	x %

Grub. žarenje = 6,89%

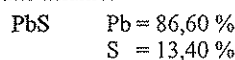
Određiti masene udele konstatovanih minerala na bazi:

- atomskih masa elemenata
- teoretskog sadržaja pojedinih elemenata u mineralu.

Izračunate podatke prikazati tabelarno i izvršiti kontrolu.

Rešenje:

❶ Kako se olovo javlja samo u jednom mineralu ove rude, to možemo pristupiti izračunavanju masenog udela galenita u sirovini. Tako imamo:



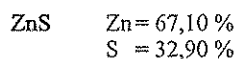
100 % PbS : 86,60 % Pb = x % PbS : 4,01 % Pb

x % PbS = 4,63 % galenita u rudi.

100 % PbS : 13,40 % S = 4,63 % PbS : x % S

x % S = 0,62 % sumpora vezano za 4,63 % galenita.

❷ Isti slučaj je i sa cinkom, koji je vezan jedino za mineral marmatit - odnosno sfalerit. Tako imamo:



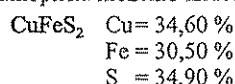
100 % ZnS : 67,10 % Zn = x % ZnS : 3,88 % Zn

x % ZnS = 5,78 % sfalerita u rudi.

100 % ZnS : 32,90 % S = 5,78 % ZnS : x % S

x % S = 1,90 % sumpora vezanog za sfalerit u rudi.

❸ Bakar se sav vezuje za mineral halkopirit. Masenu zastupljenost halkopirita možemo izračunati:



100 % CuFeS₂ : 34,60 % Cu = x % CuFeS₂ : 0,17 % Cu

x % CuFeS₂ = 0,49 halkopirita u rudi.

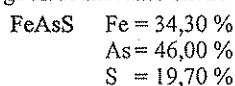
100 % CuFeS₂ : 30,50 % Fe = 0,49 % CuFeS₂ : x % Fe

x % Fe = 0,15 % Fe vezano za 0,49 % halkopirita u rudi.

100 % CuFeS₂ : 34,90 % S = 0,49 % CuFeS₂ : x % S

x % S = 0,17 % sumpora vezano za 0,49 % halkopirita u rudi.

❹ Sledeći mineral u kome se isključivo javlja arsen je arsenopirit. Njega izračunavamo slično kao i predhodni:



100 % FeAsS : 46,00 % As = x % FeAsS : 0,51 % As

x % FeAsS = 1,11 % arsenopirita u rudi.

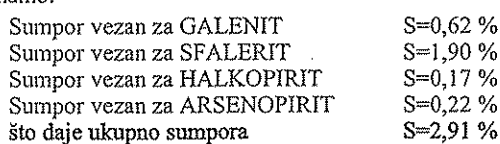
100 % FeAsS : 34,30 % Fe = 1,11 % FeAsS : x % Fe

x % Fe = 0,38 % Fe vezanog za 1,11 % arsenopirita u rudi.

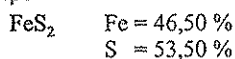
100 % FeAsS : 19,70 % S = 1,11 % FeAsS : x % S

x % S = 0,22 % sumpora vezanog za 1,11 % arsenopirita u rudi.

❺ Od sulfidnih minerala ostao je jedino pirit. Da bi izračunali maseni udeo ovog minerala, moramo prvo izračunati količinu sumpora koja je preostala iz razlike ukupnog sumpora i sumpora vezanog za predhodno razmotrene sulfidne minerale. Tako imamo:



Sumpor ukupni dobijen hemijskom analizom iznosi 30,01 %. Sumpor sulfidnih minerala iznosi 2,91%. Tako iz razlike dobijamo sumpor vezan za mineral PIRIT = 27,10 %



100 % FeS₂ : 53,50 % S = x % FeS₂ : 27,10 % S

x % FeS₂ = 50,65 % piritu u rudi.

100 % FeS₂ : 46,50 % Fe = 50,65 % FeS₂ : x % Fe

x % Fe = 23,55 % Fe vezanog za 50,65 % piritu u rudi.

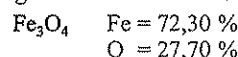
❻ Reprezentativni uzorak od 30 g propušten je kroz Devisov magnetski analizator izdvojio je 2,7 g magnetične frakcije, odnosno magnetita.

Bilans minerala (postavka)

Proizvodi	M, g	M, %
M. F.	2,7 g	
N. M. F.	27,3 g	
Ruda:	30,0 g	100,00

Nakon izračunavanja sledi da je u rudi prisutno 9,00% magnetita.

Koliko je gvožđa vezano za tih 9,00 % magnetita?



100 % Fe₃O₄ : 72,30 % Fe = 9,00 % Fe₃O₄ : x % Fe

x % Fe = 6,51 % Fe vezanog za 9% magnetita u rudi.

Ostatak od oko 2,49 % predstavlja kiseonik.

❼ Mikroskopski je utvrđeno da u sirovini ima 7,00 % hematita. Hematit, pak, u svom sastavu ima određenu količinu gvožđa. Tako imamo:



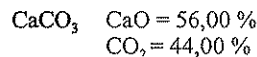
100 % Fe₂O₃ : 70,00 % Fe = 7,00 % Fe₂O₃ : x % Fe

x % Fe = 4,90 % Fe vezano za 7 % hematita u rudi.

Odnosno, za 7,00 % hematita vezano je 2,10 % kiseonika.

❸ Pošto je identifikovan mineral kvarc, to hemijska analiza na SiO₂ predstavlja u stvari 15,95 % kvarca u sirovini.

❹ Prisutan je takođe u sirovini i kalcit.



100 % CaCO₃ : 56,00 % CaO = x % CaCO₃ : 2,16 % CaO

x % CaCO₃ = 3,86 % kalcita u rudi.

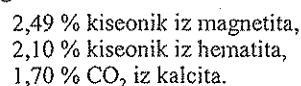
Iz toga sledi da će na CO₂ otpasti 1,70 % tokom žarenja.

❺ Da bi smo potpuno dovršili zadatak neophodno nam je da izračunamo maseni udeo limonita, za koji znamo da je sa promenljivim sadržajem vode (Fe₂O₃ · nH₂O). Iz tog razloga ćemo prvo izračunati koliko je gvožđa ostalo iz razlike ukupno analiziranog Fe i Fe koje je ušlo u sastav predhodnih minerala.

Fe vezano za	HALKOPIRIT	Fe = 0,15 %
Fe vezano za	ARSENOPIRIT	Fe = 0,38 %
Fe vezano za	PIRIT	Fe = 23,55 %
Fe vezano za	MAGNETIT	Fe = 6,51 %
Fe vezano za	HEMATIT	Fe = 4,90 %
Fe ukupno u mineralima		Fe = 35,49 %

Kako je hemijskom analizom utvrđeno Fe ukupno = 36,42 % razliku čini Fe u limonitu = 0,93 %.

Sa druge strane smo imali gubitke žarenja, od ukupno 6,89 %, od čega



Što ukupno daje 6,29%. Razlika 6,89% - 6,29% = 0,6% predstavlja kiseonik i vodu vezanih za limonit. Tako možemo zaključiti da je limonit zastupljen u rudi sa (0,6% + 0,93% Fe) = 1,53%.

100 % Fe₂O₃ : 70,00 % Fe = x % Fe₂O₃ : 0,93 % Fe

x % Fe₂O₃ = 1,33 % komponente Fe₂O₃.

100 % Fe₂O₃ : 30,00 % O₂ = 1,33 % Fe₂O₃ : x % O

x % O = 0,40 % kiseonika vezanig za Fe₂O₃.

Rezultati racionalne analize (kontrola proračuna)

Mineral	M, %	Pb, %	Zn, %	Fe, %	Cu, %	As, %	S, %	O ₂ , %	CO ₂ , %	H ₂ O, %	CaO, %	SiO ₂ , %
PbS	4,63	4,01	—	—	—	—	0,62	—	—	—	—	—
ZnS	5,78	—	3,88	—	—	—	1,90	—	—	—	—	—
CuFeS ₂	0,49	—	—	0,15	0,17	—	0,17	—	—	—	—	—
FeAsS	1,11	—	—	0,38	—	0,51	0,22	—	—	—	—	—
Fe ₂ O ₄	9,00	—	—	6,51	—	—	—	2,49	—	—	—	—
Fe ₂ O ₃	7,00	—	—	4,90	—	—	—	2,10	—	—	—	—
FeS ₂	50,65	—	—	23,55	—	—	27,10	—	—	—	—	—
CaCO ₃	3,86	—	—	—	—	—	—	—	1,70	—	2,16	—
SiO ₂	15,95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,95
Limonit	1,53	—	—	0,93	—	—	—	0,40	—	0,20	—	—
Gub. žarenjem	6,89	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Suma:	100	4,01	3,88	36,42	0,17	0,51	30,01	4,99	1,70	0,20	2,16	15,95

* Primer. Racionalna analiza 2. Ruda bakra je hemijski analizirana i dobijeni su sledeći rezultati:

$Cu_{uk} = 1,20 \%$
 $Cu_{inertni} = 0,40 \%$
 $Cu_{aktivni} = 0,80 \%$
 $Fe = 8,60 \%$
 $S = 3,50 \%$
 $Al_2O_3 = 10,12 \%$
 $SiO_2 = 73,34 \%$
 Gubitak žarenjem = 3,24 %

Mikroskopski su identifikovane sledeće mineralne vrste

Halkopirit ($CuFeS_2$) $Cu=34,60\%$; $Fe=30,50\%$; $S=34,90\%$;
 Kovelin (CuS) $Cu=66,50\%$; $S=33,50\%$;
 Halkozin (Cu_2S) $Cu=79,90\%$; $S=20,10\%$;
 Pirit (FeS_2) $Fe=46,50\%$; $S=53,50\%$;
 Magnetit (Fe_3O_4) $Fe=72,30\%$;
 Kvarc (SiO_2) $SiO_2=$

Mikrometrijskim merenjima, uz pomoć integracionog stočića, utvrđeno je da se minerali kovelin i halkozin nalaze u sirovini u odnosu 3 : 1. (Da se podsetimo $Cu_{sulfidni}$ inertni je bakar vezan za halkopirit; a bakar $Cu_{sulfidni}$ aktivni je bakar vezan za sve druge sulfide).

⊙ Sadržaj halkopirita u ovoj sirovini ćemo izračunati iz proporcije:

$$100 \% CuFeS_2 : 34,60 \% Cu = X \% CuFeS_2 : 0,40 \% Cu$$

Raspodela bakra na minerale

Minerali	Odnosi minerala	M, %	Cu, %	M x Cu	R _{cup} , % na minerale	R _{cup} , % na minerale u rudi
CuS	3	75,00	66,50 ^{*1}	199,50	71,40 ^{*5}	0,57 ^{*8}
Cu ₂ S	1	25,00	79,90 ^{*2}	79,90	28,60 ^{*4}	0,23 ^{*7}
Suma:	4	100,00	69,85 ^{*3}	279,40	100,00	0,80 ^{*6}

Legenda:

- *1 teoretski sadržaj Cu u CuS.
- *2 teoretski sadržaj Cu u Cu₂S.
- *3 $279,40 : 4 = 69,85 \%$ srednji sadržaj Cu za razmatrana dva minerala čije su mase u odnosu 3:1.
- *4 $279,40 : 100 \% = 199,50 : X \%$ sledi $X \% = 28,60 \%$.
- *5 $279,40 : 100 \% = 199,50 : X \%$ sledi $X \% = 71,40 \%$.
- *6 Podatak koji daje hemijska laboratorija da ova dva minerala, po raspodeli imaju ukupno 0,80 % Cu.
- *7 $100 : 0,80 = 28,60 : X \%$
- *8 $100 : 0,80 = 71,40 : X \%$

Prema tome maseni udeo kovelina dobijamo iz
 $100 \% CuS : 66,50 \% Cu = X \% CuS : 0,57 \% CuS$
 $X \% CuS = 0,857 \%$ kovelina u rudi.

A što se tiče sumpora, imamo
 $100 \% CuS : 33,50 \% S = 0,857 \% CuS : X \% S$
 $X \% = 0,287 \%$ S vezano za kovelin.

Maseni udeo halkozina možemo izračunati iz
 $100 \% Cu_2S : 79,90 \% = X \% Cu_2S : 0,23 \% Cu$
 $X \% Cu_2S = 0,288 \%$ halkozina u rudi.
 Ova masa halkozina vezuje za sebe sumpora
 $100 \% Cu_2S : 20,10 \% S = 0,288 \% Cu_2S : X \% S$
 $X \% S = 0,056 \%$ S vezano za halkozin.

$X \% CuFeS_2 = 1,156 \%$ halkopirita u rudi.

Iz podataka o udelu halkopirita u rudi (1,156 %) možemo izračunati koliko Fe i S veže za sebe ova količina $CuFeS_2$.

Postavimo proporciju

$$100 \% CuFeS_2 : 30,50 \% Fe = 1,156 \% CuFeS_2 : X \% Fe$$

$$X \% Fe = 0,354 \% Fe \text{ vezano za halkopirit.}$$

Odnosno, sadržaj sumpora ćemo izračunati iz proporcije

$$100 \% CuFeS_2 : 34,90 \% S = 1,156 \% CuFeS_2 : X \% S$$

$$X \% S = 0,402 \% S \text{ vezano za halkopirit.}$$

⊙ Od preostalih postoje još dva minerala nosioca bakra - kovelin i halkozin. Hemijska analiza je pokazala da je za ova dva minerala vezan sledeći sadržaj bakra: $Cu_{ukupni} - Cu_{inertni} = Cu_{aktivni}$ odnosno $1,20 - 0,40 = 0,80 \%$ sulfidnog bakra (aktivnog).

Mikroskopskom analizom je utvrđeno, takođe, da je zastupljenost kovelina tri puta veća od zastupljenosti halkozina ili drugim rečima odnos u zastupljenosti ova dva minerala u sirovini iznosi kovelin:halkozin = 3 : 1.

Prema tome prvo treba utvrditi raspodelu (teoretsku) Cu na ova dva minerala poštujući pri tome njihov odnos u zastupljenosti. U tom smislu postavimo podatke u jednu tablicu i izračunati koliko bakra, pri pomenutom odnosu 3:1, je vezano za kovelin a koliko za halkozin.

⊙ Od preostalih minerala imamo pirit (FeS_2) magnetit (Fe_3O_4), s obzirom da je samo pirit sulfid, moguće je preko sadržaja S odrediti njegovu zastupljenost. Tako imamo

$$S_{pirit} = (S_{ukupno} = 3,50\%) - [(S_{CuFeS_2} = 0,402\%) + (S_{CuS} = 0,287\%) + (Cu_{Cu_2S} = 0,058\%)] = 3,50 - 0,747 = 2,753 \%$$

Preko tog podatka izračunamo udeo pirita iz proporcije

$$100 \% FeS_2 : 53,50 \% S = X \% FeS_2 : 2,753 \% S$$

$$X \% FeS_2 = 5,146 \% \text{ pirita u rudi.}$$

Ova količina pirita veže za sebe 5,146 % $FeS_2 - 2,753 \% S = 2,393 \% Fe$

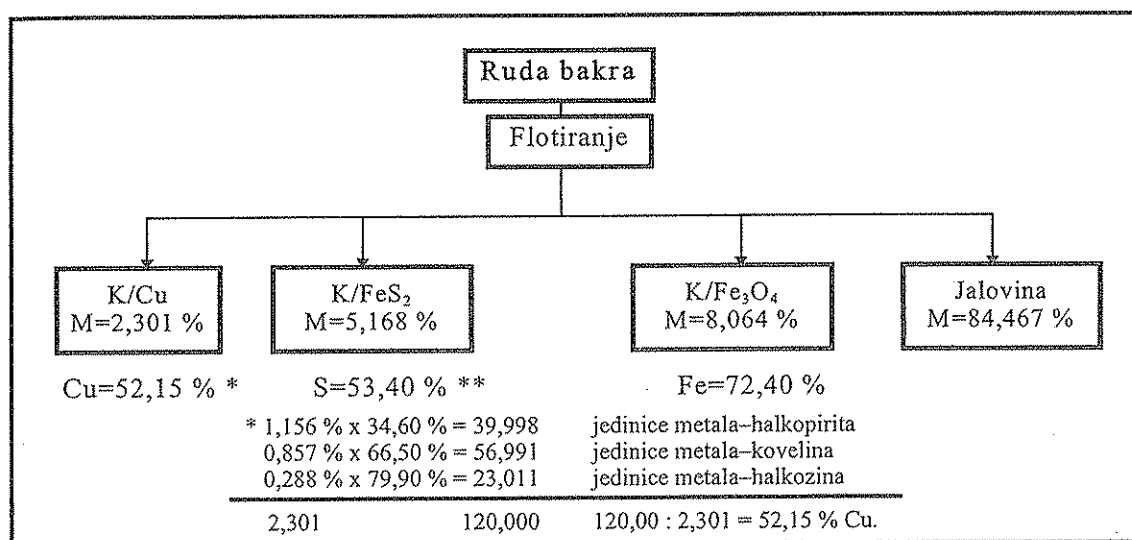
• Ostatak od ukupnog gvožđa treba vezati za magnetit, a to iznosi $(Fe_{uk} = 8,60\%) - [(Fe_{CuFeS_2} = 0,354\%) + (Fe_{FeS_2} = 2,393\%)] = Fe_{Fe_3O_4} = 5,838\%$ koji vezujemo za magnetit, prema proporciji $100\% Fe_3O_4 : 72,30\% Fe = X\% Fe_3O_4 : 5,853\% Fe$

$X\% Fe_3O_4 = 8,095\%$ magnetita u rudi.

Nakon izračunatih masenih udela identifikovanih minerala u sirovini izvršena je kontrola i prikazana u tablici bilansa minerala.

Bilans minerala (kontrola računa).

Minerali	M, %	Cu, %	M Cu	Fe, %	M Fe	S, %	M S
CuFeS ₂	1,156	34,60	39,998	30,50	35,258	34,90	40,344
CuS	0,857	66,50	56,991	—	—	33,50	28,709
Cu ₂ S	0,288	79,90	23,011	—	—	20,10	5,789
FeS ₂	5,168	—	—	46,50	240,312	53,50	276,488
Fe ₃ O ₄	8,064	—	—	72,30	583,834	—	—
Min. jal.	84,467	—	—	—	—	—	—
Ulaz	100,000	1,20	120,00	8,60	859,404	3,50	351,330



Značaj kvantitativno-kvalitativnih podataka koji se dobijaju racionalnom analizom su izuzetno važni i neophodni inženjeru pripreme mineralnih sirovina. Podaci

ukazuju na približno maseno iskorišćenje proizvoda koji se izdvajaju selektivno iz sirovine tokom tehnološkog procesa koncentracije.

4.2 IDENTIFIKACIJA MINERALNIH ZRNA U PROIZVODIMA PMS

4.2.1 UVOD

Identifikacija minerala na terenu, postrojenjima i laboratorijama za PMS može da se izvrši na osnovu njihovih fizičkih osobina. Determinacija, po određenim postupcima, jednostavnih fizičkih osobina minerala kao što su sjaj, boja, tvrdina i dr., uz pomoć jednostavnih mikroskopa, omogućuju svrstavanje datih minerala u odgovarajuće grupe i njihovo definitivno određivanje. Danas postoji približno 3500 poznatih minerala, ti podaci su 1976. godine publikovani od strane P. Emburey-a, u "Nova imena minerala 1926.-1976".

Liste minerala su svake godine dopunjavane novim imenima i pretežno su to minerali koji su otkriveni zahvaljujući novim analitičkim tehnikama, ponajpre elektronskoj mikrosondi. Jedan broj "minerali" je, međutim, brisan sa lista kada bi se modernim metodama izučavanja utvrdilo da je prvobitno određen samostalni mineral u stvari kompleksna smeša više mineralnih vrsta. Broj poznatih minerala, bez obzira na sve, ipak polako raste zahvaljujući novim modernim metodama izučavanja i eksploataciji novih resursa. Inženjeri operativci, na svu

sreću, veći deo vremena se upućuju na vrlo mali broj poznatih determinisanih mineralnih vrsta. Mnoge mineralne vrste su ekstremno malo zastupljene ili su samo muzejski eksponati i oni neće biti predmetom zanimanja u ovoj knjizi. Drugi pak ne spadaju u korisne ili ekonomski interesantne minerale, dok jedan veliki broj minerala predstavlja samo podvrste nekog minerala, kao na primer feldspati koji su podeljeni u 9 do 10 subvrsta. Ove podele su od esencijalne važnosti za mineraloge, kristalografe i geologe nekih specijalnosti, međutim generalno govoreći najčešće nisu od posebnog značaja inženjerima PMS.

Time se broj mineralnih vrsta koje srećemo u sirovinama, rudama sa merljivim sadržajem korisne supstance ili produktima koncentracije, svodi praktično na 250 do 300 imena. Štaviše, jedno ležište ili grupa ležišta, prostorno vezanih za jedno postrojenje za PMS, odnosno koncentraciju, može prosečno da sadrži 10-15 minerala koje je neophodno da inženjer "pripremaš" poznaje i prati tokom tehnološkog tretmana sirovine.

4.2.2 MINERALNI SASTAV SIROVINE

Pre nego što počnemo sa identifikacijom i karakterizacijom minerala, koji čine sirovinu koju treba ispitati, korisno je da se podsetimo osnovnih termina vezanih za same minerale, genezu i rudna ležišta. Kao prvo postavlja se pitanje šta sve predstavlja sirovinu. *Sirovine predstavljaju agregati minerala koji se odgovarajućom rudarskom delatnošću (rudarenjem) vade (metodama eksploatacije) iz samog ležišta i pripremaju za dalju preradu.*

Rudni minerali predstavljaju minerale koji u sebi nose korisne supstance koji se koriste u industriji (najčešće su se ovde podrazumevali metali), dok nerudni minerali predstavljaju nekorisnu komponentu-jalovinu za dato ležište. Granice između ovih grupa minerala su često samo uslovne, podložne promenama, jer su promenljivi i tehničko-ekonomski kriterijumi prema kojima se ova razgraničenja vrše. Otuda u jednom momentu neki od nerudnih minerala može postati i ekonomski interesantan. Minerali koji grade rudu, pored osnovnih komponenata, često sadrže i veoma raznovrsne prateće elemente, koji mogu biti i karakteristični ne samo za određene minerale već i genetske tipove ležišta.

Rudna ležišta mogu biti delom ili potpuno, izgrađena od samorodnih metala odnosno elemenata. Minerali koji ulaze u sastav rudnih ležišta (po broju i količini) mogu biti veoma brojni. Postoje raznovrsne klasifikacije minerala rudnih ležišta, od kojih bi istakli one gde je klasifikacija u osnovi mineraloška, i obuhvata određene grupe minerala prema sastavu i kristalografskim karakteristikama, dok u drugim radovima minerali su razvrstani prema pripadnosti pojedinim tipovima ležišta ili vodećih rudnih metala (minerali gvožđa, bakra i td.).

4.2.3 SKLOP RUDA

Formiranje mineralnih agregata praćeno je i određenim odnosom između pojedinih minerala (međusobna prorastanja, razvoj individualnih minerala, njihove razmere i oblici, kao i raspored u prostoru). Kao zbirni izraz za produkte svih procesa kristalizacije i obrazovanja mineralnih agregata koristi se sklop rude. *Sklop rude određen je strukturama i teksturama.*

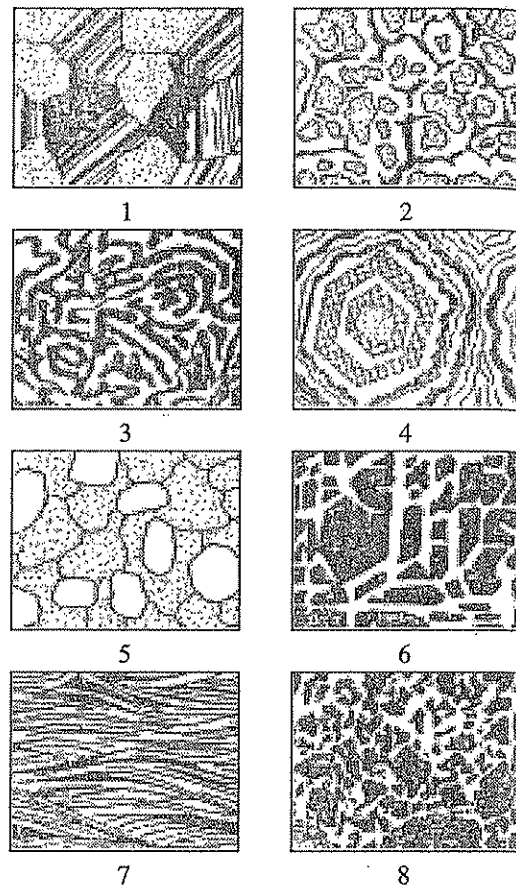
Struktura rude predstavlja građu pojedinih minerala u okviru mineralnih agregata i karakteristike njihovog razvoja i uzajamnog prorastanja, oblika i razmera pojedinih mineralnih individua.

Teksture ruda su odraz prostorne razmeštenosti i međusobnog odnosa pojedinih mineralnih agregata koji se razlikuju po obliku, razmerama, sastavu i strukturi.

Prema razmerama mineralnih agregata izdvajaju se:

- megastrukture koje odražavaju razmeštenost mineralnih agregata na velikim površinama (u domenu rudnog tela ili nekih njegovih pojedinih delova)
- makrostrukture se zapažaju u domenu komada rude
- mikrostrukture se odnose na razmeštaj sitnih mineralnih agregata, koji se uočava tek pri mikroskopskim ispitivanjima.

S obzirom na veliki značaj koji sklop rude ima, kako za proučavanje njene geneze, tako i kasnije za procese PMS, u tabeli 4.5. je prikazana opšta klasifikacija struktura i tekstura ruda, koja se oslanja na razmere zrna i morfološke kriterijume.



Sl.4.6 Tipovi pojedinih struktura prorastanja minerala (Smirnov, 1976; Tatarinov, 1975.): 1-ravnomerno-zrnasta; 2-petljasto-metasomatska; 3-složeno prorastanje; 4-zonalna struktura; 5-hipidiomorfno-zrnasta; 6-struktura zamenjivanja; 7-vlaknasta; 8-struktura drob-ljenja.

Klasifikacija koju je predložio Ramdor (1960.) zasnovana je na genetskim obeležjima i razlikuju se sledeći sklopovi ruda:

♦ Strukture primarnog endogenog deponovanja mogu biti: zrnaste, kuglaste, porfirske, grafičke, zonearne, oolitske, bakterijalne.

♦ Koloidalni sklop. Prema obliku se mogu izdvojiti sledeći tipovi: bubrežasti, kolomorfni, kugličasti, koncentrično-slojeviti, gelski, finodisperzne infiltracije i disperzije, zrakasto-crtaste i upletene.

♦ Sklop vezan sa procesima sedimentacije i stvaranja rudišta.

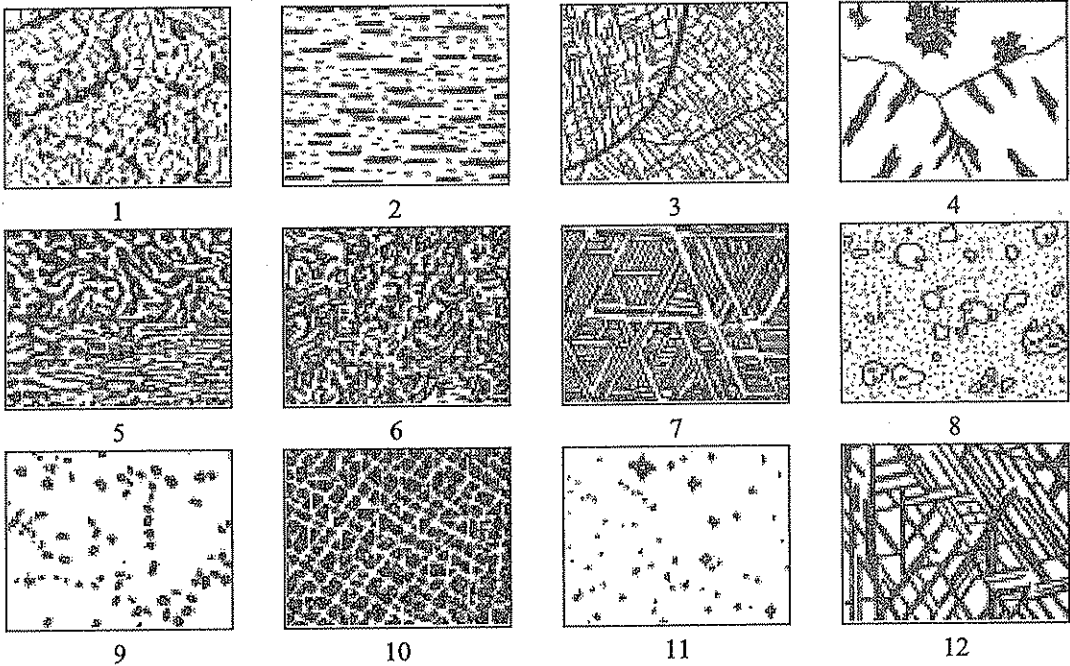
♦ Strukture (sklop) preobražavanja su vrlo raznovrsne: paramorfoze, izdvajanja, raspadanja, metasomatoze, strukture termičkog preobražavanja i sklopovi iz oksidaciono-cementacione zone.

Među brojnim strukturama, vezane sa određenim procesima pri obrazovanju rudnih ležišta, svakako su najznačajniji sledeće:

Strukture izdvajanja. Kao posledica hlađenja i razdvajanja čvrstih rastvora dolazi često do obrazovanja struktura izdvajanja koje pokazuju vrlo raznovrsne oblike, što zavisi od faza koje u tome uzimaju učešće i mesta na kojima dolazi do stvaranja zametaka. Strukture izdvajanja mogu biti orijentisane duž određenih karakterističnih strukturnih obeležja minerala-domaćina, ali su

Tabela 4.5 Klasifikacija struktura i tekstura (Schneiderhohn, 1952.).

I STRUKTURE RUDA		
Prema razvoju oblika mineralnih agregata	Jedinstveni sklop	Ksenomorfne strukture Hipidiomorfne strukture Panidiomorfne strukture Porfirske strukture
	Struktura prorastanja i složeni sklop rude	Igličaste, mirmekitsko-grafitske Strukture izdvajanja Pojkilitске Diablastično-dijalitske
Prema relativnoj veličini mineralnih komponenata	Prema relativnoj veličini zrna	Ravnomerno zrnasti Neravnomerno zrnasti
	Apsolutna veličina zrna	
II TEKSTURE RUDA		
Prema prostornom uređenju	Zrnaste, bez izražene orijentacije	
	Jednostavne, usmerene	Peraste, listaste, radijalne, koncentrično-slojevite
	Pravilne i ritmičko-trakaste	Slojevite, naborane, koncentrično slojevite, oolitske i konkrecione
Prema načinu ispunjavanja prostora	Kompaktne, porozne i zrnaste, zupčasto-miarolitske, kopljaste, mandolaste, družne, "čelije raspoređene po ljuskama".	

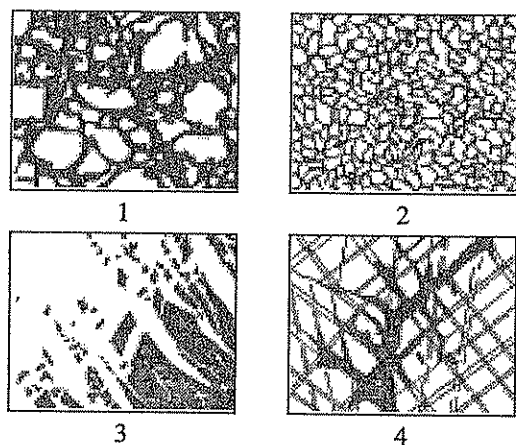


Sl.4.7 Strukture izdvajanja (Ramdor, 1960): 1-Intergranularna struktura; 2-Strukture izdvajanja ilmenita u hematitu; 3-Mrežasta struktura; 4-Izdvajanje pertlandita u pirotinu; 5-Mirmekitska-grafička struktura galenit-burnonit; 6-Prorastanje stibarsen-arsen; 7-Lamelarna struktura izdvajanja bornit-halkopirit pri hlađenju; 8-Kao predhodna samo pri zagrevanju; 9-Emulziona struktura; 10-Tekstilna struktura ilmenit u magnetitu; 11-Halkopiritske zvezdice u sfaleritu; 12-Lamelarne strukture ilmenita u magnetitu.

poznate i strukture, gde su izdvajanja bez neke posebne istaknute pravilnosti. Ovde se mogu izdvojiti: rast iz velikog broja međusobno nezavisnih zametaka, kada se izdvojene faze javljaju u vidu malih plaža po čitavom zrn minerala domaćina. Oblici i razmeštaj izdvojenih faza su vrlo promenljivi, a udeo u mineralu-domaćinu retko kad prelazi 10 %. Tipičan primer su emulzione strukture i strukture "ponavljanja u serijama". Rast duž kristalografskih ravni se često manifestuje mrežastim strukturama. Primer parova i grupa pojedinih sulfidnih i ok-

sidnih minerala koji grade strukture izdvajanja iz čvrstih rastvora su: hromit-hematit, hematit-rutil, hematit-ilmenit, hematit-ilmenit-rutil, magnetit-hematit, magnetit-ilmenit, bornit-halkozin, bornit-halkopirit, halkozin-kovelin, galenit-tetraedrit, pirotin-pentlandit, sfalerit-halkopirit. Detaljna izučavanja i karakteristike struktura izdvajanja dao je Ramdor (1955, 1960.) i on izdvaja sledeće strukture: - potpuno nepravilni oblici minerala gosta; - oble kapljice minerala gosta; - emulzije pravilnih izdvajanja minerala gosta; - lamelarne

strukture izdvajanja; – mrežasta prorastanja; – skeletne strukture; – strukture u vidu girlandi; – mirmekitske ili grafičke strukture; – izdvajanja po obodu zrna (Sl.4.7).



Sl.4.8 Strukture zamenjivanja (Smirnov, 1976.): 1–potiskivanje halkozina piritom; 2–sitnomrežasta struktura kuprita u halkozinu; 3–neodigenit potiskuje bornit; 4–dendritična struktura potiskivanja kalcita galenitom duž lamela bližjenja.

Strukture zamenjivanja. Strukture zamenjivanja nastale potiskivanjem, jednog minerala drugim, su vrlo rasprostranjene u rudnim ležištima. U ovim procesima koji su hemijski “otvoreni” učestvuju katjoni, anjoni ili i jedni i drugi. Prema karakteru prorastanja minerala koji učestvuju u procesu zamenjivanja razlikuju se:

Strukture nepravilnog zamenjivanja koje se javljaju kada mineral koji vrši potiskivanja se širi u mineralu domaćinu bez nekog uticaja njegovih strukturnih elemenata. Među strukturama potiskivanja izdvajaju se sledeće: finomrežaste strukture, reliktnne strukture, skeletne strukture, grafičke strukture, mrežaste, zonarne, cementacione (Sl.4.8).

Eutektoidna zamenjivanja. Ove strukture nastaju kroz dva porcesa: *potiskivanje zamenom*, pri čemu se obuhvata uvođenje novih komponenata iz spoljnih izvora i pretvaranje faze–domaćina u dve nove, eutektoidne faze, i *potiskivanje raspadanjem* obuhvata raspad ranije postojeće faze, gubitak komponenata i konverzija starije faze u jedno eutektoidno prorastanje od dve ili više novih faza.

Teksture ruda kao i strukture mogu biti veoma raznovrsne: masivne, pegaste, trakaste, sferoidalne (nodularne, prstenaste, oolitske, bobičaste), brečaste, mrežaste, kolomorfne, šupljikave, ćelijaste i dr. Na narednoj slici 4.9 prikazani su karakteristični primeri tekstura ruda.

4.2.4 MINERALNE PARAGENEZE

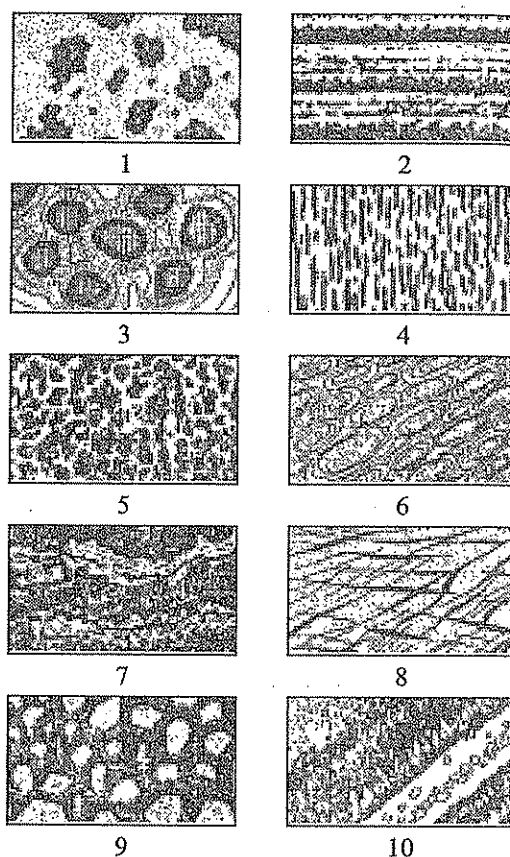
U rudnim ležištima se obično sreće zajedno više minerala. Prema postanku i njihovim međusobnim odnosima mogu se razlikovati mineralne parageneze i mineralne asocijacije.

Mineralna parageneza predstavlja grupu minerala koji su nastali zajedno u rudištu pod određenim fizičko–hemijским uslovima. Pojam mineralne parageneze obuhvata minerale koji su nastali u ravnotežnim uslovima, pri određenom odnosu sadržaja inertnih komponenata i

fiziko hemijskim osobenostima potpuno mobilnih komponenata.

Mineralna asocijacija predstavlja grupu minerala koji su nastali u različitim genetskim procesima, tako da njihovo zajedničko pojavljivanje u prostoru može biti i sasvim slučajno.

Mineralna facija predstavlja asocijaciju mineralnih parageneza obrazovanih u određenim fiziko–hemijским uslovima.



Sl.4.9 Primeri tekstura ruda (Smirnov, 1976.; Tatarinov, 1975.): 1–pegava; 2–trakasta; 3–kokardasta; 4–ritmičko trakasta; 5–sunderasta; 6–oolitska; 7–kolomorfna; 8–žiličasta; 9–brečasta; 10–trakasto zupčasta.

4.2.5 TIPOVI ORUDNJENJA

Rudna tela, koja čine ležišta, mogu biti različitih oblika, što je posledica procesa mineralizacije korisnim komponentama i strukturno–litoloških karakteristika sredine u kojoj se ti procesi odvijaju. Orudnjene zone odnosno konture rudnih tela mogu biti oštro izražene ili su prelazi iz rudnih tela u okolne stene postepeni. Prema geološko–ekonomskim karakteristikama izdvajaju se prirodne granice (konture) ili su granice rudnih tela izvučene na osnovu tehno–ekonomskih pokazatelja.

Prema stepenu koncentrisanosti korisnih minerala u rudnim telima i načinu ispunjavanja prostora, razlikuju se sledeći tipovi (Sl.4.10):

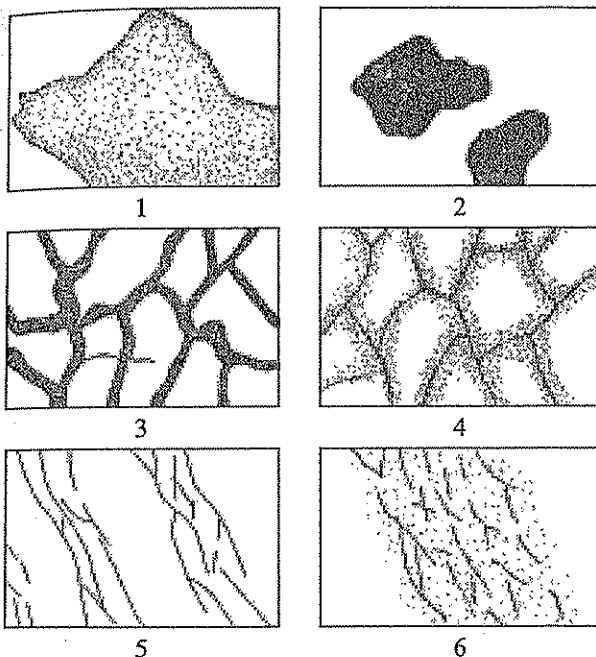
□ **Impregnacioni tip orudnjenja** predstavlja neravnomerno raspršenu mineralizaciju rudnih minerala u orudnjenom prostoru.

□ **Kompaktna (masivna) orudnjenja** su visoke koncentracije korisnih minerala u orudnjenom prostoru.

□ Štokverkno-impregnacioni tip predstavljen je orudnjenjem u kome se, pored impregnacija javlja obično sistem sitnih prslina i tankih pukotina, ispunjenih korisnim rudnim mineralima.

□ Žiličasti tip se odnosi na orudnjenje koje ispunjava, rudnim mineralima, kratke prsline i pukotine sa izraženom orijentacijom (preovlađuje jedan pravac pružanja).

□ Žiličasto-impregnacioni tip je sličan prethodnom, samo što se među orudnjenim prslinama i pukotinama javljaju i rasejane rudne impregnacije.



Sl.4.10 Tipovi orudnjenja: 1-impregnacioni, 2-masivni-kompaktni, 3-štokverknj, 4-štokverkno-impregnacioni, 5-žiličasti i 6-žiličasto impregnacioni.

U mnogim rudnim ležištima rudna tela mogu da budu izgrađena od više tipova orudnjenja, pri čemu obično jedan od njih preovlađuje.

4.2.6 FIZIČKO-HEMIJSKE OSOBINE MINERALA

Unutrašnje uređenje, razmeštaj atoma i međusobne kohezivne sile, određuju ne samo spoljašnje forme i simetriju kristala, već i čitav niz važnih fizičkih osobina minerala. Prema osobinama određene strukture, neke fizičke osobenosti kod izvesnih minerala se mogu razlikovati već prema tome iz kog ugla se posmatraju. Prema tome, kažemo da su kristali minerala anizotropna tela, odnosno oni pokazuju različite fizičke osobine u različitim položajima. Kod amorfni materijala, s druge strane, sve fizičke osobine su nezavisne od ugla osmatranja ili pravca njihovog ispoljavanja. Iz toga sledi da su amorfne materije izotropne, odnosno pokazuju iste osobine bez obzira iz kog se ugla posmatraju. Svi minerali poseduju izvesne fizičke osobine, međutim, svaki mineral ima neku tipičnu karakteristiku koja je od posebnog značaja pri njegovoj identifikaciji. Neke od ovih osobina minerala biće razmotrene u daljem tekstu.

4.2.7 SJAJ

Sjaj predstavlja jedan od redovno najtačnijih, i lako prepoznatljivih osobina. Po pravilu već na prvi pogled mineral otkriva svoj sjaj. Pada nam u oči bljesak ili samo određeni sjaj nastao kao refleksija - odbлесak svetla sa pljosni kristala, površine cepljivosti ili svežeg preloma specimena. Ova osobina minerala uopšte zavisi od količine i tipa reflektovanog i refraktovanog svetla kao i od kvaliteta površine minerala. Treba napomenuti da određeni minerali nemaju uvek isti sjaj. Sjaj je direktno vezan sa količinom odbijenog svetla ili apsorbovanog pa delom reflektovanog sa površina unutar minerala. Složena priroda ovog fenomena je uzrok što imamo velike varijacije i tipove sjaja kod minerala. Najveći odbлесak usmerenog svetla sa površine minerala prestavlja upravo njegov sjaj. Ako je sjajni mineral opak (neprovidan) njegov sjaj je metalični (pirit, galenit). Prirodni minerali sa velikom količinom reflektovanog i refraktovanog svetla takođe imaju intenzivan sjaj koji nazivamo đijamantskim. Tamno obojeni minerali sa visokom refrakcijom svetla kao i neki neprovidni minerali reflektuju samo deo svetlosti koji podseća na metalični sa nešto prigušenim mutnim sjajem. Ovakav sjaj nazivamo submetalični (bornit, magnetit, grafit, kolumbit). Neki prozirni minerali pokazuju vrlo visok sjaj ali samo na površinama bližnjnja. Takav sjaj nazivamo staklastim - sjajem ogledala (volframit), i vrlo je karakterističan za mnoge minerale. Grupa providnih minerala koji pokazuju staklast sjaj je naročito brojna (kvarc na površinama pljosni kristala, kalcit, mikroklin, beril). Međutim, postoje i providni ili prozirni minerali sa nešto umanjenom refleksijom a koji su dosta rasprostranjeni u zemljinoj kori. Specijalni tipovi sjaja su posledica bilo strukture agregata ili savršene cepljivosti. Tako neki providni minerali sadrže fine međuprostore između lističastih kristalnih pljosni, ispunjenih vazduhom, koji pokazuju karakterističan sedefast sjaj zbog interne refleksije svetlosti (muskovit, plagionit, opal, gips). Agregati providnih sitno-vlaknastih minerala stvaraju utisak svilastog sjaja (hrizotil-azbest) i spadaju u specijalne tipove sjaja. Svetlost koja prelazi i rasipa se po neravnoj poroznoj površini stvara utisak mutnog, mat sjaja (kaolin, limonit). Finozrnasti agregati minerala koji odaju svetao difuzan sjaj takođe daju utisak mutnog. Postoji sjaj koji se opisuje kao "blag", mastan, (nefelin, sumpor, kvarc na neravnim prelomima), ili smolast (pehblenda) tip sjaja.

U vrlo specifične tipove sjaja ili preliivanja neki autori svrstavaju sledeće:

♦ Opalescencija (kod plemenitog opala), kao raznobojnost i preliivanje svetlosti u mineralu, zavisno od pravca upadnog svetla.

♦ Fosforescencija je osobina prema kojoj neki minerali emituju svetlost, nakon što su bili izloženi zagrevanju, trenju ili su bili izloženi radijaciji, odnosno zračenju UV-lampom. Neki varijeteti fluorita kada se usitne i zagrevaju na gvozdenoj ploči, pokazuju jasnu fosforescenciju. Kada se međusobno taru, zrnca kvarca, u zatamnjenom prostoru, emituju fosforescentno svetlo. Viljemit Zn_2SiO_4 fosforescira kada se izloži X-zračenju.

♦ Izlaganje sunčevoj svetlosti ili čak slabijem difuznom svetlu, kod mnogih minerala može da izazove fosforescenciju odnosno luminescenciju koju možemo videti ako ih prenesemo i posmatramo u zamračenoj prostoriji.

♦ **Fluorescencija** - otpuštanje, zračenje svetla iz minerala ekscitacijom pojedinih jona u rešetki putem osvetljavanja (kvarcna lampa), zagrevanjem ili trenjem (fluorit, po kome je efekat i dobio ime; barit);

♦ Obojeni preliv i metalni bljesak je karakteristika **irizacije** ili iridizacije - senzibilizovane fluorescencije, i predstavlja igru boja na određenim pljosnima kristala (anortoklas, labrador, bitovnit) gde dolazi do interferencije zraka svetlosti i tankog sloja ili kapljica vode zarobljene između pljosni na samom kristalu minerala.

Neophodno je posedovati izvesnu veštinu razlikovanja različitih tipova sjaja, jer je ova osobina minerala vrlo značajna i smatra se da je sjaj nepromenljiva karakteristika većine minerala i prema tome od velike je pomoći pri njihovoj identifikaciji.

4.2.8 BOJA

Svega nekoliko, ili tačnije mali broj, minerala ima stalnu prepoznatljivu boju, ali i pored toga ova osobina minerala nam često pomaže razlikovanje mnogih korisnih minerala. Premda promenljive, boje mnogih minerala su relativno iste pod određenim uslovima. Poznavajući ove uslove mi možemo ovu osobinu minerala koristiti kao sredstvo pri njihovoj identifikaciji. Boja minerala je često prepoznatljivo konstantna u okviru jednog ležišta ili nekoliko ležišta pa čak i u sklopu rudnog polja i regiona, što može biti od velike koristi pri identifikaciji.

Uzroci obojenja minerala nisu u potpunosti poznati i uglavnom se objašnjavaju spregom različitih faktora. Boja minerala najčešće može da zavisi od njegovog hemijskog sastava.

A.E.Fersman je predložio klasifikaciju obojenja minerala na sledeće tipove:

- **idihromatska**, izazvana su hromoforima;
- **stereohromatska**, obojenja su zavisna od struktura kristalnih pljosni minerala;
- **energohromatska**, obojenje vezano za različita energetska stanja atoma uzrokovana radioaktivnim zračenjem;
- **alohromatska**, obojenja izazvana prisustvom različitih vrsta inkluzija ili fino dispergovanim nečistoćama neke druge mineralne vrste;
- **pseudohromatska**, obojenja nastala kao posledica rasipanja i interferencije svetlosnih talasa sa površine i iz unutrašnjosti nehomogenih bezbojnih kristala minerala (površinskih i internih nehomogenosti bezbojnih kristala minerala).

Idihromatska obojenja minerala su najrasprostranjenija i konstantna. **Betehtin** izdvaja minerale - etalone, odgovarajućih stabilnih i postojanih boja, prema kojima se opisuju boje minerala pri njihovoj identifikaciji.

M.P.Jones (1987.) kod određivanja boje minerala, pri njihovoj identifikaciji, predlaže klasifikaciju prema uzroku obojenja i efektu koji nastaje. Uzroke obojenja, a samim tim i klasifikaciju posmatra sa aspekta uzroka koji daju efekat karakteristične boje.

♦ **Absorpcija bele svetlosti**. Boja minerala (materijala) je uzrokovana absorpcijom specifične talasne dužine, upadnog svetlosnog snopa, i ova absorpcija može primetno i upadljivo da varira zavisno od prisustva neznatnih količina izvesnih elemenata. Tako, mala količina hroma u berilu daje mu tamno-zelenu boju, mineral

kvarc može biti bezbojan, roza, plav, žut ili crven već zavisno od prisustva i najmanjih količina - gvožđa, vanadijuma, hroma ili mangana, odgovarajuće.

Tablica 4.6. *Etalonske boje pojedinih minerala*

Boja	Mineral
1. ljubičasta	Ametist
2. plava	Azurit
3. zelena	Malahit
4. žuta	Auripigment
5. oranž	Krokoit
6. crvena	Cinabarit
7. mrka	Limonit
8. žuto-mrk	Zemljasti limonit
9. kalajno beo	Arsenopirit
10. olovno-siva	Molibdenit
11. kalajno-plav	Galenit
12. željezno-crni	magnetit
13. indigoplav	kovelin
14. bakarno-crven	samorodni bakar
15. limun-žut	halkopirit
16. zlatno-žut-met.	zlatno

Boje minerala ruda metala su relativno postojane i konstantne. Pirit je uvek žut, halkopirit je mesingano-žut, bornit je uvek bronzano-mrk itd. Međutim, neki metalni minerali zamagljuju vrlo brzo u atmosferi sa prisustvom vlage.

♦ **Fino dispergovane čestice**. Mnoge boje minerala potiču od prisutnih fino dispergovanih nečistoća, stranih tela i tako na primer, neznatne količine dispergovanih inkluzija gvožđevog oksida u inače bezbojnom kvarcu stvorile utisak žute ili crveno-mrke boje. Razlike u boji u okviru iste mineralne vrste mogu biti prouzrokovane fizičkom diskontinualnošću i strukturnom imperfekcijom (nesavršenošću). Tako mineral opal ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) koji je sačinjen od bezbrojnih sićušnih silicijumovih sfera a sama diskontinualnost među tim sferama je uzrokom efekta višebojnosti tzv. "opalescenciji" minerala (vidi fluorit, termoluminescencija, drugi vid luminescencije je i triboluminescencija - lomljenjem, grebanjem, udaranjem).

♦ **Promena boje termalnim efektima**. Boje nekih minerala, koji imaju strukturne defekte, mogu biti promenjene pri termičkom tretmanu ili njihovim bombardovanjem elektromima. Promenom boje poludragog kamele - minerala termičkim tretmanom služe se ponekad nesavesni trgovci juveliri povećavajući cenu kod topaza ili cirkona. Promena boje kontrolisanim termičkim tretmanom minerala može prema tome, biti, značajan dijagnostički parametar. Mada, što nije redak slučaj, sama promena boja minerala pri različitom termičkom tretmanu može da unese i izvesne zabune pri determinaciji.

♦ **Efekti fluorescencije**. Manji broj minerala fluorescira u ultra ljubičastoj svetlosti ili kada su podvrgnuti x-zračenju. Optička fluorescencija ima značajnu ulogu u dijagnosticiranju minerala. Tako na pr. kalcit i šelit imaju najčešće belu boju i teško ih je međusobno razlikovati. Izlaganje minerala ultraljubičastom svetlu - "šelitske lampe", kalcit neće pokazivati nikakve efekte dok će še-

lit fluorescirati, emitovati svetlost u jasnim plavim tonovima (isti slučaj je i sa viljemitom). Slično je i sa parom minerala kvarc-dijamant koji se javljaju zajedno i pod normalnim okolnostima teško ih je razlikovati. Međutim, karakteristika dijamanta je da fluoreskira u vidljivom delu spektra pri bombardovanju x-zracima, dok kvarc ne pokazuje takve efekte (metod se koristi pri separaciji u industriji dijamanta).

♦ **Fluorescencija u elektronskom snopu.** Neki minerali, posebno oni koji sadrže izvesne strukturne defekte, fluoresciraju pri bombardovanju snopom elektrona i tada se ovaj fenomen naziva katodoluminescencija. Efekti katodoluminescencije su vrlo korisni u dijagnosticanju minerala ali još nisu našli široku primenu. Različite boje katodoluminescencije mogu se registrovati uz pomoć savremenih elektronskih mikro sondi.

4.2.9 OGREB ILI PRAH MINERALA

Fino sprasjen mineral pokazuje veću stabilnost odnosno, nepromenljivost boje nego i sam masivni specimen. Zbog toga se ovom fenomenu poklanja daleko veća pažnja i koristi se vrlo često u identifikaciji minerala. Boja ogreba ili praha minerala se u mnogim slučajevima razlikuje od boje samog minerala. Tradicionalno, se ogreb ili prah utvrđuje kao bojeni trag na belo etalonskoj ne glaziranoj porcelanskoj pločici koja po Mosovoj skali ima tvrdinu 6-6,5. Minerali koji su tvrdi, imaju veću tvrdinu od 6, neće ostaviti bojenog traga na pločici već samo ogrebotinu. Njihova boja praha se utvrđuje usitnjavanjem odnosno mlevenjem. Istovremeno, u pripremi mineralnih sirovina, se boja praha (najsitnije klase krupnoće) utvrđuje na "rudarskom tanjiru", ispirajući pažljivo po jednu frakciju minerala, npr. u toku flotiranja (u laboratoriji ili pogonu). Kada se radi sa nakvašenim uzorkom, u tankom sloju vode, to će i efekti boja praha minerala doći još jače do izražaja. Kod prospekcije minerala, boja praha se može utvrditi i na ispitaku (u postrojenju za PMS ekvivalent je rudarski tanjir) kod same identifikacije minerala sitne frakcije pri uzorkovanju rasipa, peskova i dr.

Tablica 4.7 Primeri nekih minerala njihovih boja i boja njihovog praha

Mineral	Boja minerala	Boja praha
Pirit	Žut	Crno-zelenkast
Hematit	Siv	Višnja crven
Volframit	Crn	Mrka
Kasiterit	Crn	Skoro bezbojan
Pirotin	Duvansko mrka	Crn
Halkopirit	Zlatno-žut	Zelenkasto crn

Minerali koji pokazuju idiohromatski tip obojenja često imaju i nešto svetliji i stabilniji bojeni efekat ogreba, dok drugi tipovi obojenja generalno pokazuju bezbojan ili svetlo siv ogreb odnosno prah. Crni ogreb je karakterističan za neprovidne minerale sa metalničnim sjajem. Providni minerali se karakterišu bezbojnošću, belim ili samo ređe bojenim ogrebom. Prozirni minerali mogu imati bezbojan, beo ili bojen ogreb. Ogreb minerala sa polumetalničnim i submetalničnim sjajem imaju pouzdanije dijagnostičke karakteristike.

Tačan opis boje ogreba ili praha minerala je stvar rutine i određuje se sa dosta poteškoća i nepreciznosti. S toga se ponekad predlaže klasifikacija minerala u jednu od tri grupe:

1. prah beo ili bezbojan ;
2. prah "tamn" (mrk ili crn), i
3. prah "obojen" tj. crven, žut, zelen, plav itd.

4.2.10 POTAMNENJE, ZAMAGLJENJE

Bojeno zamagljenje u vidu skrama, prevlaka ili tankog filma izazvano oksidacijom površine minerala u vlažnim uslovima ili kvašenjem, najčešće maskira pravu boju minerala i otežava njegovu identifikaciju. Ovakva zamagljenja podsećaju na svetlosne efekte - ulja na površini vode. Treba imati u vidu da su sveži prelomi minerala najpouzdaniji pri identifikaciji.

4.2.11 PROZRAČNOST I PROVIDNOST

Prozračnost i providnost su osobine minerala koje su vrlo promenljive. Za mineral kažemo da je providan ako se kroz njega može pročitati neki tekst. Takvi su kristali kvarca, kristali kamene soli, topaz, gorski kristal (kalci), dijamant. Nečistoće, inkluzije i strana tela u providnim mineralima smanjuju njihovu providnost i oni postaju prozirni. Mnogi rudni minerali su prozirni samo po rubovima ili vrlo tankim preseccima, kao sfalerit, pirargirit i dr. Minerali sa metalničnim i mat sjajem zovemo apsolutno neprovidnim, opakim. Stepenn providnosti minerala određen je njihovom strukturom. Tako zrnasti agregati gipsa ili liskuna (muskovit) su neprovidni ili jedva prozirni. Istovremeno krupni kristali istih minerala su savršeno providni.

4.2.12 KOHEZIONE OSOBINE MINERALA

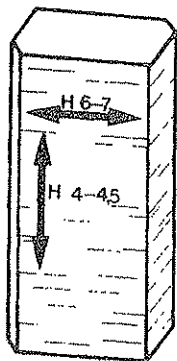
Ova važna grupa osobina minerala uslovljena je strukturnim karakteristikama njihovih kristala, a naravno zavise i od položaja kristala i dejstva uticaja na njih. Glavne kohezivne osobine kristala minerala su: tvrdina, klivaž, lomljivost, cepljivost (svaka težnja i suprotstavljanje promeni).

4.2.13 TVRDINA

Zavisno od hemijskog sastava i građe kristalne rešetke minerali ispoljavaju i različitu tvrdinu. Tvrdina kao vektorska veličina varira i od kristalografske orijentacije. Sama metoda utvrđivanja tvrdine je dosta gruba i zavisi ponekad od kristalografske pljosni (anizotropije kristala) na kojoj se tvrdina ispituje. Npr., tvrdina kijanita može da pokaže vrednosti od 5 kada se meri na pljosni paralelnoj sa najdužom osom kristala ili 6 do 7 kada se meri poprečno na pomenutu osu kristala.

Tako minerali grafit, gips ili talk su vrlo mekani mogu se zagrebat i noktom. Kristal kalcita se može zagrebat i iglom ili nožićem, a to ne može da se uradi na kristalu kvarca, jer će igla jednostavno skliznuti sa površine. To važi i za dijamant koji pokazuje izuzetnu, najvišu tvrdinu. Navedeni minerali pokazuju različitu tvrdinu na ogreb odnosno oni (pokazuju) indiciraju (snagu) silu otpora površine kristala mehaničkom oštećenju.

Pri određivanju tvrđine minerala na ogreb koristimo se skalom tvrđine, koju je predložio *Fridrich Mohs* (1773-1839.). Set standardnih minerala koji služe za opšte utvrđivanje tvrđine nepoznatih minerala na ogreb je prikazana u tablici 4.8.



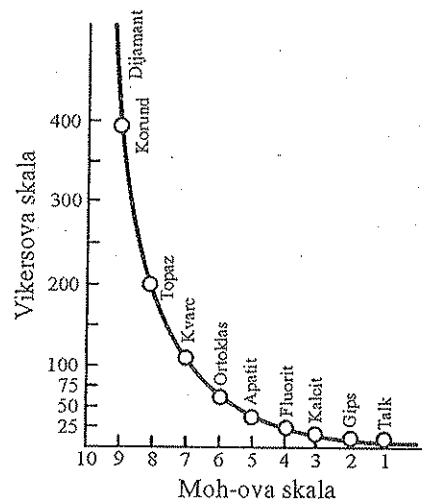
Sl.4.11 Primer razlike u tvrđini na paranje kod minerala kijanita

Generalno, minerale čiju kristalnu rešetku grade jake kovalentne veze teško je narušiti (kvarc, dijamant), dok minerali čija struktura leži na slabim *Van der Waals*-ovim vezama mogu biti vrlo lako narušeni odnosno pokazuju manju tvrđinu.

Elementi Mohs-ove skale tvrđine na ogreb stoje aproksimativno u geometrijskoj progresiji, tako svaki naredni mineral je oko dva puta tvrdi od predhodnog pratećeg (Sl.4.12).

Postupak utvrđivanja Mohs-ove tvrđine na ogreb, kao mere otpora minerala da bude narušen - ogreban, je jednostavan. Ravna površina standardnog minerala, najmanje tvrđine, pokuša se zagrebat nepoznatim specimenom. Ako specimen zagrebe površinu standardnog minerala, postupak se nastavlja na narednom, sve dotle dok standardni ne bude ogreban. Vrednost tvrđine nepoznatog minerala u tom slučaju leži u granicama ova dva poslednja ispitivana standardna minerala.

U slučaju da imamo sitna zrna nepoznatog minerala (usitnjena monomineralna sirovina, proizvod koncentracije, frakcija minerala) koje ne možemo pridržavati pristima, tada postavljamo po zrno minerala koji se ispituje na glatku površinu standarda i čvrsto ga pritismo parčetom drveta (po mogućnosti mekog lipovog) i pokušamo povlačenjem zagrebat površinu standarda. Postupak utvrđivanja tvrđine na dalje je isti kao i kod krupnih komada.



Sl.4.12 Dijagram odnosa Mohs-ove tvrđine minerala na ogreb i Vickers-ove tvrđine iz testova utiskivanja indentora

4.2.14 TVRDINA PO VICKERSU

Drugi, više kvantitativan način utvrđivanja tvrđine nego Mohs-ov, jeste utvrđivanje otpornosti minerala na deformaciju ili razrušenje. Najčešće primenjivan metod merenja jeste **VHN postupak** (Vickers Hardness Number), ili tvrđina minerala po Vickers-u, naročito pogodna za vrlo sitna zrna koja se nalaze ne izdvojena u stenskoj masi, sirovini. Vickers-ova tvrđina se određuje kao otpornost minerala na deformisanje kada se kristalom dijamanta standardnog oblika, dejstvuje u jednoj "tački" poznatom silom za određeno vreme.

Dijamantski vrh, piramidalnog oblika se utiskuje na poliranu površinu nepoznatog minerala, određenom stalnom silom koja odgovara masi od 10 do 100 grama, u trajanju od nekoliko sekundi. Dubina prodiranja i narušavanja polirane površine minerala indicira i njegovu tvrđinu. U praksi je međutim lakše meriti površinu otiska, vrha dijamantske piramide, nego same dubine. Vickers-ova trđina se izražava obrascem

$$VHN = \frac{2 \cdot \sin 68^\circ \cdot F}{d^2} = \frac{1,8544 \cdot F}{d^2} \quad (g/\mu m^2)$$

ili

$$VHN = \frac{1854,4 \cdot F}{d^2} \quad (g/mm^2)$$

Tablica 4.8 Skala tvrđine minerala po Mohs-u sa referentnim tvrdinama poznatih stvari

Tvrđina	Tipični mineral	Referentna tvrđina poznatih stvari
1	Talk	Vrlo meki, mogu se lako zagrebat noktima (2.5)
2	Gips	Umereno meki, mogu zagrebat olovo
3	Islandski kalcit	Bakarni novčić (3) ili žica ostavlja trag
4	Fluorit	Može se zagrebat gvozdenim predmetom (4-4,5) ili staklom (5).
5	Apatit	Džepni nožić (6) zagrebe minerale do ove tvrđine
6	Feldspat	Mogu zagrebat čelični nožić ili mogu zagrebat prozorsko staklo
7	Kvarc	Svi minerali tvrdi od 6 mogu zagrebat prozorsko staklo
8	Topaz	
9	Korund	
10	Dijamant	

gde je **VHN (Vickers Hardness Number)** Vikersova tvrđina, F-sila utiskivanja u gramima, a d-površina otiska deformiranog minerala u mm². Obično se za određivanje tvrđine koristi sila odnosno masa od 100–200 grama, koja se utiskuje u mineral čija je dijagonala reda 5–100 μm. Često puta se poliranjem postiže "tvrda" površina minerala od same supstance u dubini. Prema tome treba imati u vidu da se pri merenju tvrđine obezbedi dovoljno velik pritisak na površinu minerala da bi moglo da dođe do utiskivanja dijamantskog vrha kroz alterisanu površinu u nealterisanu unutrašnjost. Detalje o postupcima merenja tvrđine ovim metodom mogu se naći kod Zussman-a (vidi literaturu).

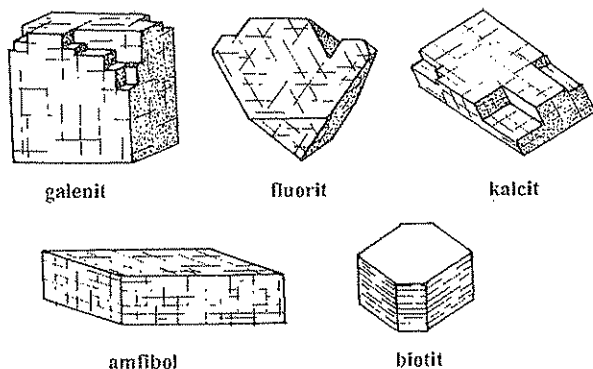
Poređenja radi, vrednosti za Vikersovu tvrđinu (VHN) se mogu staviti u odnos sa mnogo češće upotrebljavanom tvrđinom po Mosu, preko sledeće jednakosti:

$$\log VHN = 2,5 \log Mohs + 100$$

4.2.15 KLIVAŽ, CEPLJIVOST

U procesu pripreme mineralnih sirovina, naročito u primarnim operacijama usitnjavanja, primećeno je da se neki minerali lako i rado lome duž određenih kristalografskih pravaca. Ova osobina minerala da se dele usled pritiska ili udara duž ravni odnosno pljosni paralelnih pljosnima kristala se zove **cepljivost** ili **klivaž**. Lomljenje minerala koje ima za posledicu stvaranje novih komada sa ponovo glatkim površinama je u vezi sa internom kristalnom strukturom tih minerala. Minerali teže da se cepaju duž pravaca sa najmanjom kohezijom, a neki se čak na taj način cepaju (lome) u nekoliko međusobno ortogonalnih pravaca, kao što su galenit, kamena so (halit), težeći pri tome stvaranju kocki; drugi pak, kao fluorit grade odnosno se drobe u komade forme oktaedra; kalcit u romboedarske fragmente, itd.

Drugi minerali, kao što su gips, liskuni, imaju samo jedan pravac perfektne cepljivosti a u drugim pravcima je nejasna ili odsustvuje. Klivaž ili cepljivost prozirnih i providnih minerala je često indicirana finim pukotinama. Pri detaljnijem ispitivanju lako se može videti da je reč o kristalografskim pljosnima ili bliznjenju minerala.



Sl.4.13 Primeri minerala sa izraženom cepljivošću: galenit, fluorit, kalcit, amfibolit i biotit.

Klivaž ili cepljivost mogu da se kategorišu prema osobinama - da li se minerali lako lome i prema glatkoći površina cepljivosti. Tako se liskuni lako cepaju u tanke glatke listiće. Kvalitet takve cepljivosti određen je kao savršena. Nešto lošija cepljivost je oktaedarska kod fluorita i određena je kao perfektna. Postoji i cepljivost ko-

ju određujemo kao nesavršenu prizmatičnu, kao kod nefelina. A ona pak može biti teže ili lakše primetna. Ukoliko se lako zapaža, nesavršenu cepljivost nazivamo **jasnom**, a postoje i minerali kod kojih se cepljivost uopšte ne zapaža (pirit, kvarc), **nejasna**.

4.2.16 DELJIVOST

Deljivost je osobina minerala da se lome po određenim pravcima a koji nisu u vezi sa strukturom kristala. Deljivost, za razliku od cepljivosti, je kontrolisana ambijentalnim uslovima u toku procesa kristalizacije minerala. Prekid u rastu kristala, precipitacija stranog materijala na pljosnima, teže stvaranje površina ili **pljosni strukturo** **no oslabljenih** duž kojih će mineral kasnije lakše podleći pucanju. Razdvajanje bliznjenih kristala se često odvija duž takvih pljosni.

4.2.17 POVRŠINE KRISTALA

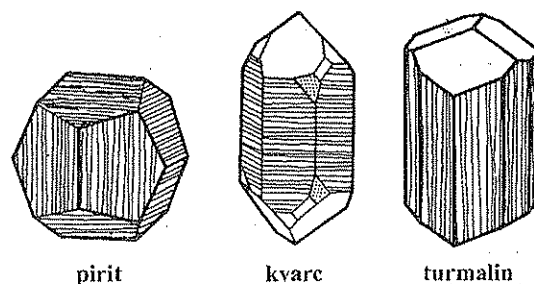
Jedno od obeležja - karakteristika kod prepoznavanja minerala mogu biti i **pljosni kristala**. Naime, nemaju svi kristali ili agregati kristala (ili bliznjeni kristali) ravne odnosno glatke kristalografske pljosni. Čak su češći slučajevi da su im pljosni na izvestan način deformisane, da su uzdužno ili poprečno crtasti ili da imaju **strije**. Tipični primeri kristala sa obeležjem strija mogu se navesti kod pirita, arsenopirita, kvarca i turmalina i predstavljaju važno obeležje pri njihovoj identifikaciji.

4.2.18 POVRŠINE PRELOMA MINERALA

Površine preloma minerala koje ne pokazuju preferirane pravce loma kao što su klivaž odnosno cepljivost ili deljivost, karakterišu se ne zakonomernim pravcima preloma koji po spoljnjem izgledu mogu biti klasificirani na sledeći način:

- | | |
|-------------------|-----------------------------------|
| • školjkast | - kod opala, magnezita, halkozina |
| • neravan, hrapav | - kod pirita |
| • ravan, gladak | - kod vircita |
| • iverast | - kod aktinolit |
| • kovrdžast | - kod samorodnog srebra |
| • zemljast | - kod limonita |
| • hrapav | - kod diopsida |

Poznavanjem ovih odlika preloma nekih minerala ili agregata kristala je od velikog značaja naročito pri identifikaciji odnosno karakterizaciji mineralnih zrna usitnjene sirovine ili proizvoda PMS, sa kojima se svakodnevno u praksi srećemo.



Sl.4.14 Karakteristični primeri pojave strija odnosno "crtastih" pljosni kod minerala pirita, kvarca i turmalina.

4.2.19 KRTOST I ŽILAVOST MINERALA

Minerali se razlikuju međusobno po ponašanju pri različitim mehaničkim dejstvima (kao što su kovnost, savitljivost, žilavost, krtost). Tako npr., ako se pri paranju minerala, čestice praha minerala raspršuju u stranu kažemo da je mineral krt (kvarc, feldspat). Ukoliko prah minerala ostaje neposredno uz ogrebotinu - mineral je mekan (talk, kreda). Mineral nazivamo kovnim ako se pri paranju površine ne stvaraju čestice već ostaje samo ožiljak ogreba (samorodni bakar). Ukoliko mineral možemo raskovati čekićem, kažemo da je **plastičan** (kao što je platina, zlato, srebro). Savitljivi minerali su oni koji nakon savijanja ostaju u tom položaju (Cu samorodni, plemeniti samorodni metali, hlorit, antimonit). Elastični su oni minerali koji se posle dejstva sile vraćaju u prvobitno stanje (muskovit, biotit).

4.2.20 BLIŽNENJE MINERALA

Pod bližnjenjem minerala podrazumeva se spособnost obrazovanja sraslaca ograničenih ravnim pljosnima, pri mehaničkom dejstvu (udaru, pritisku, rastezanju). Površine bližnjenja su razmeštene paralelno mogućim postojećim pljosnima kristala gradeći na taj način pravilne geometrijske forme koje nezivamo blizancima. Bližnjenje se povezuje sa gradom atoma odnosno razmeštajem atoma u kristalnoj rešetki. Razlikuju se minerali sa **savršenim** (vrlo dobrim), sa **izvrsnim** (ili odličnim), **manje приметnim** (ali dobrim) i **slabim** bližnjenjem.

Dok se po drugoj podeli bližnjenje kategoriše na:

- veoma savršeno
- savršeno
- srednje savršeno, i
- nesavršeno ili slabo.

Liskuni i liskunski minerali poseduju izrazito savršeno bližnjenje, perpedikularno glavnoj osi "c"; čak oko 50% rudnih minerala pokazuje bližnjenje po kocki, oktaedru ili rombdodekaedru.

4.2.21 GUSTINA MINERALA

Poznavanje gustine minerala je veoma važna karakteristika kako pri identifikaciji tako i u praktičnoj primeni kod razdvajanja frakcionisanja i koncentracije različitim tehnološkim tretmanima. Na bazi razlika u gustinama asocijacije minerala razvijene su čitave oblasti koncentracije a u okviru njih razrađeno je niz metoda pripreme mineralnih sirovina u procesu valorizacije sirovina. *Minerali sa velikom atomskom masom (Ag, Au, Pt) odlikuju se visokom gustinom, minerale metaličnog sjaja karakteriše srednja, a sa nemetalničnim sjajem, niska gustina.*

Postoji izvesna uzajamna povezanost gustine i tvrdine minerala. Naime, *sa porastom tvrdine povećava se i gustina.* Klasifikacija minerala u grupe bliskih tvrdina može se izvršiti na više načina (kao što je prikazano u narednoj tabeli 4.9). Ovakva relativna tvrdina je dovoljna za orijentaciona saznanja i klasifikaciju minerala pri determinaciji. Generalno, gustina prirodnih minerala se kreće u rasponu od 0,8 do 21.

Druga podela minerala u grupe razlikuje četiri kategorije gustina:

- laki minerali (ispod 2,50),
- minerali srednje gustine (2,50-3,30),

- teški minerali (3,40-6,00), i
- vrlo teški minerali (preko 6,00).

Tablica 4.9 Klasifikacija minerala prema gustini

Mineral	Gustina	Karakteristike gustine
Kamena so	2,20	mala gustina
Gips	2,30	
Kvarc	2,65	srednja gustina
Kalcit	2,70	
Ortoklas	2,76	relativno visoka gustina
Plagioklas	2,78	
Biotit	2,90-3,20	
Augit	3,30-3,50	
Amfibol	2,90-3,50	
Olivin	3,30	
Granat	3,50-4,20	
Cirkon	3,90-4,80	
Magnetit	5,20	visoka gustina
Hematit	5,30	
galenit	7,00	
Srebro	10,50	vrlo visoka gustina
Zlato	15,5-19,4	
Platina	21,50	

Gustina minerala predstavlja relativan broj koji označava koliko je puta ista količina vode teža ili lakša od njega. Fizička veličina gustine nekog minerala se definiše kao njegova masa po jedinici zapremine, i najčešće se daje u jedinicama kg/m^3 odnosno g/cm^3 . Istovremeno specifična masa predstavlja odnos masa minerala prema masi iste zapremine vode na 277°K ; ova veličina je bezimni broj. Tako imamo da je gustina kvarca 2650 kg/m^3 a specifična masa 2,65. Gustina je jedna od osnovnih skalarnih karakteristika svih minerala i jedno od najvažnijih dijagnostičkih osobina. Razdvajanje minerala u laboratorijskim ili tehnološkim uslovima se zasniva kod niza metoda upravo na razlici u gustinama asocijacije minerala.

Tablica 4.10 Primer promene gustine minerala zavisno od atomske mase katjona

Mineral	Formula	Atomska masa katjona	Specifična masa
Celestin	SrSO_4	Sr 87,63	4,00
Barit	BaSO_4	Ba 137,36	4,50
Anglezit	PbSO_4	Pb 207,21	6,30

Gustina minerala zavisi od vrste atoma koji čine materiju minerala kao i od načina na koji su ti atomi međusobno "pakovani", odnosno gustina zavisi i od hemijskog sastava minerala i od njegove kristalne strukture. Tako dva ugljenikova minerala imaju gustine: dijamant $2,54 \text{ g/cm}^3$ a grafit $2,30 \text{ g/cm}^3$. Istovremeno tri SiO_2 minerala, kvarc, tridimit i kristobalit imaju gustine 2,65; 2,26 i $2,38 \text{ g/cm}^3$. Manje varijacije u odnosima katjona u sklopu izomorfni serija minerala neće značajno uticati na gustinu pakovanja atoma, međutim značajnije promene u sastavu minerala mogu prouzrokovati promene u kristalnoj strukturi a posledica toga je promena gustine mineralnih faza. Kao primer se može navesti ra-

pidan rast gustine od kolumbita ($\text{Fe,Mn Nb}_2\text{O}_6$) koji ima gustinu 5300 kg/m^3 do tantalita ($\text{Fe, Mn Ta}_2\text{O}_6$) koji ima gustinu 7300 kg/m^3 . Promene u gustini minerala mogu se pripisati i promenama u kristalnoj strukturi koja ne mora biti praćena i promenom u njihovom hemijskom sastavu.

4.2.22 KRISTALNE FORME, STANJA AGREGACIJE

Pod najpovoljnijim uslovima svoga nastanka minerali zadobijaju određene i konačne **kristalne forme**. Zahtevi su da kristal može slobodno da raste u rastvoru ili rastopu, iz koga se formira, ne sputavan rastom drugih čvrstih materijala niti deficitom supstance za rast. U takvom okruženju, mineral se razvija kao kristal sa svim svojim pljosnima i odgovarajućim uglovima među njima, što čini karakteristiku datog minerala pri identifikaciji. Sve karakteristike kristala minerala generalno možemo izraziti sledećim terminima:

□ Minerali mogu da se pojave sa dobro razvijenim kristalima, kada kažemo da **imaju kristalne forme**. Većina predivnih uzoraka minerala u muzejima predstavljaju kristale minerala (oni su iskristalisali).

□ Ukoliko minerali nemaju razvijenih kristala odnosno kristalnih formi, već se javljaju agregati međusobno prorasli, sa zrnima nepravilnog oblika, kažemo da **imaju kristalaste forme**.

□ Za minerale koji imaju izvesne začetak ili samo naznake kristalne strukture kažemo da su **kriptokristalasti**.

□ Potpuno odsustvo kristalastih struktura ukazuje na **amorfne forme**.

Razvoj jednog individualnog kristala, ili agregata kristala, sa izvesnim definisanim spoljnim oblikom, zavisi od spoljašnjih uslova tokom njegovog nastanka. Zavisno od okruženja mogu se razviti dugi igličasti kristali ili pak kratkostubičasti ili tabličasti kristali, a to je moguće za jedan te isti mineral ukoliko se javlja u različitim oblicima.

Opisni termini za oblike minerala mogu biti dati:

- ① za individualne kristale, i
- ② za agregate kristala, kakve mi najčešće srećemo kod usitnjene sirovine.

Individualni kristali minerala

- ♦ **igličasti** – fino igličasti kristali andaluzita, antimonita, rutila;
- ♦ **tanko pločasti** – kristali selenita;
- ♦ **vlaknasti** – kod azbesta ili varijeteta gipsa;
- ♦ **lisnasti** – kao kod muskovita, vermikulita;
- ♦ **lamelarni** – sastoje se od razdvojivih pločica ili listića kao kod volastonita;
- ♦ **prizmatični** – izduženi u jednom pravcu kao kod feldspata, piroksena ili horblendita;
- ♦ **mrežasti** – grade čitav splet, mrežu kao kod rutila sa kvarcom;
- ♦ **tabličasti** – pljosnati, tanki kristali kao kod sanidina i volastonita.

Agregati kristala mogu biti:

- ♦ **sočivasti, bademasti** – agregati česti kod zeolita, gde minerali zauzimaju prostor gasnih šupljina i mehurića u lavi;

- ♦ **grozdasti** – sferični agregati formiraju grozdove kao kod azurita i prenita;
- ♦ **stubičasti** – masivni agregati grade kolone, kao kod stalagmita i stalaktita od kalcita;
- ♦ **konkreциони i nodularni** – sferične, elipsaste, čvornovate ili mase nepravilnog oblika;
- ♦ **dendritični i razgranati** – agregati koji liče na mahovinu ili grančice drveta ali uvek deponovani u jednoj ravni, kao manganovi minerali;
- ♦ **zrnasti (saharoidalni)** – agregati krupnih ili sitnih kristala ali ujednačene krupnoće, kao olivini u dunitima;
- ♦ **sferoidalni** – agregati spljoštenih sfera ili kapsula kao kod minerala urana, mangana;
- ♦ **bubrežasti** – najčešće agregati limonita, getita, azurita, malahita;
- ♦ **atolasti** – agregati kristala formirani po obodu drugih agregata prstenasto, u više "slojeva";
- ♦ **radijalno zrakasti** – agregati kristala složeni oko kruga ili sfere sa rastom u svim pravcima kao kod barita ili kod mnogih konkreција;
- ♦ **kovrdžasti** – agregati samorodnog srebra, bakara;
- ♦ **zvezdasti** – agregati tankih kristala koji rastu iz jednog centra – radijalno, zvezdasto kao kod vavelita;
- ♦ **vlaknasti** – agregati višestruko duži od ostalih dimezija kao kod kvalitetnih azbesta.

4.2.23 PSEUDOMORFIZAM

Pseudomorfizam je osobina minerala da se javlja i da preuzima (pozajmljuje) oblike nekog drugog minerala. Pseudomorfoze mogu nastati na više načina i tu razlikujemo:

- ♦ **inkrustacijom**, prekrivanje skramom – deponovanje i prekrivanje jednog minerala po njegovim pljosnima nekim drugim
- ♦ **infiltracijom** – kada se šupljine ili mikropukotine ispunjavaju i u njima deponuje neki drugi mineral
- ♦ **zamenjivanjem** – sporo i postepeno zamenjivanje novim mineralom na mestu gde je predhodni ispran i odnet rastvorima. Odlika ovog tipa pseudomorfizma je da se zamena vrši pre nego što je predhodni mineral potpuno oslobodio prostor.
- ♦ **alteracijom** – posledica je postepene hemijske promene, tako da sastav kristala biva otpuno izmenjen i oni postaju sasvim druga supstanca bez obzira što zauzimaju isto mesto odnosno imaju isti oblik.

4.2.24 FIZIOLOŠKA SVOJSTVA (MIRIS, OPIP, UKUS, RASTVORLJIVOST)

Miris. Izvesni minerali imaju karakterističan miris pri udaru, trenju, zagrevanju ili kad ih dahom zagrejemo i ovlažimo. Pri opisu se najčešće koriste sledeći termini: **miris belog luka**, imaju minerali koji, pri njihovom zagrevanju, sadrže arsen; **miris rotke ili rena** imaju minerali koji, pri njihovom zagrevanju, sadrže selenijum; **miris sumpora** ili miris sumpora koji gori, imaju minerali – sulfidi, pri njihovom zagrevanju odnosno pirit pri udaru; **miris pokvarenih jaja** imaju, pri zagrevanju ili trenju, neki varijeteti kvarca ili krečnjaka; **miris močvare** i barskog mulja imaju gline ili ilovača kada ih našim dahom zagrejemo i ovlažimo.

Opip. Za pojedine minerale, pri njihovoj karakterizaciji i identifikaciji, je interesantan osećaj koji imamo

pri samom dodiru. Minerali mogu da imaju gladak opip, mastan, zejtinast, hrapav, grub, hladan, topao ili mogu da se lepe za jezik.

Ukus. Karakteristika minerala da imaju određeni ukus uslovljena je prvenstveno njihovom rastvorljivošću u vodi. Koriste se najčešće sledeći termini: **slan**, za minerale ukusa kuhinjske soli; **lužast**, **alkalan** za minerale šalitre; **kiseo** ukus koji potiče od sumporne kiseline; **gorak** ukus Epsom-ove soli (hidratisani magnezijum sulfat); **slatko** **opor** ukus stipse; **opor** ukus hidratisanog sulfata gvožđa (zelena galica).

Rastvorljivost. Karakteristika jednog broja minerala je i njihova rastvorljivost u vodi. Primeri minerala rastvorljivih u vodi prikazan je u tablici 4.11. Primer može biti i bišofit $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ koji se rastvara u vodi 35-54 g/l; halit 26-35 g/l; soda ili natron $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ 17,8 mg/l i drugi (Tablica 4.11).

4.2.25 ELEKTRO OSOBINE MINERALA (ELEKTROPROVODNOST, ELEKTROTOPORNOST)

Minerali se prema svom ponašanju u električnom polju mogu podeliti u tri glavne grupe: na dobre provodnike (uglavnom su tu sulfidi, sulfosoli, samorodni metali), na srednje i slabe provodnike (oksidi i hidroksidi) i neprovodnike (silikati, karbonati, fosfati, i neki drugi minera-

li). Svakako da postoje i neki izuzeci u ovakvoj podeli, što može biti posledica različitih primesa.

Savremeni elektro separatori mogu bez teškoća razdvajati minerale prve dve grupe od minerala u trećoj grupi. Lako razdvajanje minerala prve i druge grupe je moguće samo u posebnim slučajevima (Tablica 4.12).

4.2.26 RADIOAKTIVNE OSOBINE MINERALA

Jedna od merljivih karakteristika određenih minerala je i njihova **radioaktivnost**. Na terenu ili tokom rada u laboratoriji, ova pojava se može registrovati priručnim **radiometrom** (Gaiger-Milerov brojač). Radioaktivnost je kod minerala posledica prisustva radioaktivnih elemenata u samoj rešetki kristala. Radioaktivni minerali mogu da sadrže uran i torijum koji se, kao što je poznato, vremenom raspadaju pri čemu se emituju određeni radioaktivni zraci. Količina produkata raspadanja vremenom se povećava i stoga, poznajući brzinu raspadanja (odnosno vreme poluraspada) određenih radioaktivnih minerala i koristeći ostatak raspadnutog materijala može se izračunati starost radioaktivnog minerala odnosno starost stene u kojoj se ovaj mineral nalazi. Ovaj metod se koristi u **geohronologiji**, geološkoj disciplini koja se bavi određivanjem geološke starosti stenskih kompleksa (Milovanović, 1991.).

Tablica 4.11 Primeri rastvorljivih minerala u vodi

Mineral	Teoretski sastav, Formula	Sistemi kristalizacije	Boja praha	Obeležje
Alunit, kalinit	$4[KAl(SO_4)_2 \cdot 12 H_2O]$	Teseralan	Bela	stipsa
Boraks, tinkal	$4[Na_2B_4O_7 \cdot 10 H_2O]$	Monokl.	Bela	
Karnalit	$12[KMgCl_3 \cdot 6 H_2O]$	Rombičan	Bela	
Halkantit	$2[CuSO_4 \cdot 5 H_2O]$	Trikliničan	Beloplava	"plava galica"
Epsomit	$4[MgSO_4 \cdot 7 H_2O]$	Rombičan	Bela	"Epsonova so"
Glauberit	$Na_2Ca(SO_4)_2$	Monokliničan	Bela	
Halit	$4[NaCl]$	Teseralan	Bela	"kuhinjska so"
Mirabilit	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	Monokliničan	Bela	"Glauberova so"
Na-šalitra	$2[NaNO_3]$	Heksagonalan	Bela	"Čileanska šalitra"
Sasolit	$4[B(OH)_3]$	Trikliničan	Bela	Borna kiselina
Silvin	$4[KCl]$	Teseralan	Bela	
Soda (natron)	$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	Monokliničan	Bela	Kristalna soda
K-šalitra	$4[KNO_3]$	Rombičan	Bela	
Trona	$Na_3H(CO_3)_2 \cdot 2H_2O$	Monokliničan	Bela	

Tablica 4.12 Dielektrična propustljivost

Dobri provodnici		Srednji i slabi provodnici	Neprovodnici	
Antracit	Rutil	Antimonit	Dijamant	Muskovit
Arsenopirit	Srebro	Boksit	Anortit	Olivin
Galenit	Tetraedrit	Volframit	Apatit	Sumpor
Hematit	Titanomagnetit	Almandin	Barit	Silimanit
Grafit	Halkozin	Kasiterit	Biotit	Staurolit
Zlato	Halkopirit	Cinabarit	Volastonit	Turmalin
Ilmenit	...	Korund	Gips	Fluorit
Kovelin		Siderit	Kalcit	Celestin
Magnetit		Smitsonit	Kamena so	Cirkon
Molibdenit		Hromit	Kvarc	Šelit
Pirit		Cirkon	Kianit	Epidot
Pirotin		Sfalerit	Kleofan	Monacit
Platina		Kaolinit	Magnezit	...

U grupu jako radioaktivnih minerala ubrajamo: hatčetolit (uran–tantalova modifikacija pirohlor sa 10–15 % U_3O_8 i 20–30 % Ta_2O_5), karnotit $K_2(UO_2)_2[VO_4] \cdot 3 H_2O$, autunit $Ca(UO_2)_2[PO_4]_2 \cdot (10–12) H_2O$, torbernit $Cu(UO_2)_2[PO_4]_2 \cdot (8–12) H_2O$, uraninit UO_3 , nasturan i drugi. U grupu slabo radioaktivnih minerala se ubrajaju: kolumbit–tantalit, lovčorit, rinkolit, perovskit, loparit, pirohlor–mikrolit, titano–tantal–niobati, cirkon (cirtolit, malakon).

4.2.27 FLUORESCENCIJA MINERALA

Spособnost pojedinih minerala da emituju svetlost pod uticajem prinete energije naziva se luminiscencija. Uzrok luminiscencije je povratak elektrona sa višeg energetskog nivoa na niži, pri čemu se oslobodena energija manifestuje zračenjem svetlosti određene talasne dužine. Pored prinete energije za postizanje efekta luminiscencije neophodno je da postoji i deformacija kristalne rešetke, najčešće usled prisustva nekog drugog elementa u tragovima, aktivatora luminiscencije. Uzrok luminiscencije može biti i udar (kleofan izaziva kratkotrajnu zelenkasto plavičastu svetlost pri udaru – triboluminiscencija); zagrevanje (fluorit, barit, kalcit, volframit sa pojavom termoluminiscencije); ili kada se minerali izlože ultraljubičastim, rendgenskim ili gama zracima kada se izaziva fotoluminiscencija.

Emisija ultraljubičaste svetlosti postiže se pomoću kvarcne lampe sa filtrom (ultraljubičastim) talasne dužine žive, što se postiže takozvanom “šelitskom lampom” koju najčešće koristimo na terenu ili za rutinsku kontrolu u laboratoriji.

Karakteristične boje luminiscencije minerala ozračenih ultraljubičastim zracima “šelitske lampe”:

Crvena, ciglacrvena, narandžasta	Aleksandrit, anglezit, apatit, barit, gips, dolomit, kalcit, kleofan, korund, feldspat, skapolit, smitsonit, topaz
Žuta, narandžastozuta, zlatnozuta, zelenozuta	Dijamant, anglezit, apatit, barit, gips, dolomit, kalcit, povelit, skapolit, smitsonit, topaz, ceruzit, cirkon, šelit
Zelena, zelenozuta, plavičastozelena	Dijamant, barit, povelit, topaz, fluorit, šelit
Plava, zelekastoplava, plavičastobela, bela	Dijamant, anglezit, apatit, barit, beril, dolomit, kalcit, kvarc, korund, feldspat, skapolit, smitsont, topaz, fluorit, ceruzit, šelit
Ljubičasta, sivljubičasta, siva	Dijamant, apatit, barit, beril, kalcit, feldspat, fluorit

4.2.28 PRIBOR I INSTRUMENTI ZA DETERMINACIJU FIZIČKIH I HEMIJSKIH OSOBINA MINERALA

Identifikacija minerala van laboratorija (na terenu, rudniku, pogonu za PMS) ne zahteva neke posebne pribore i instrumente. Dovoljno je imati sledeće:

- geološki čekić (ili mali mineraloški čekić);
- veću ili manju lupu, prenosivi mikroskop;
- kompas (za geologe i mineraloge na terenu);
- dobar džepni nožić (“švajcarski oficirski nožić”);
- neglaziranu keramičku pločicu za utvrđivanje ograde odnosno boje praha;
- kolekciju referentnih minerala, koji odgovaraju Mohovoj skali tvrđine ili odgovarajuće standarde – parče kvarca, prozorskog stakla, čeličnu iglu, bakar–ni novčić;
- fotografski papir;
- pincete, špahtlu, predmetna stakla ili sahatno staklo.

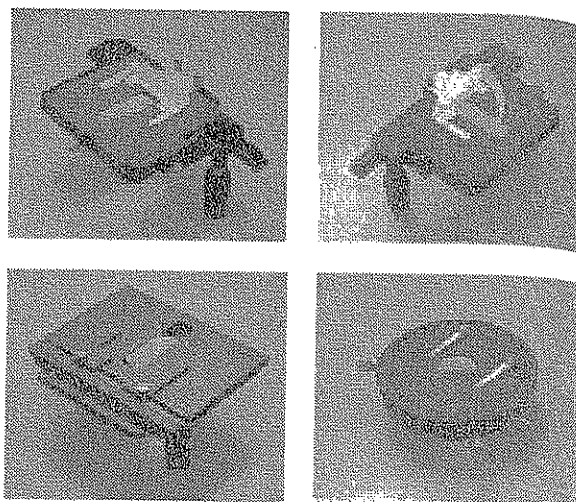
Pored toga korisno je imati, ukoliko to terenski uslovi dozvoljavaju, radiometar–Gaigerov brojač, UV–lampu, sklopivi mikroskop, elektromagnet, ispitak za šli–hovanje (ispiranje) teških minerala. Dok odlično opremljene ekipe na terenu, mogu imati i portabl uređaj za sečenje, brušenje i poliranje stenskog materijala i izradu mikroskopskih preparata (rudnih ili petrografskih).

4.2.29 STEREOBINOKULARNI MIKROSKOP

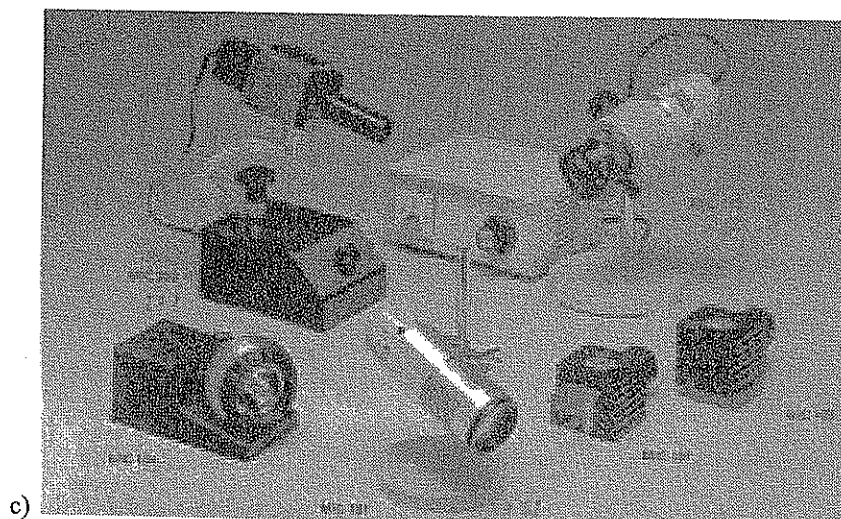
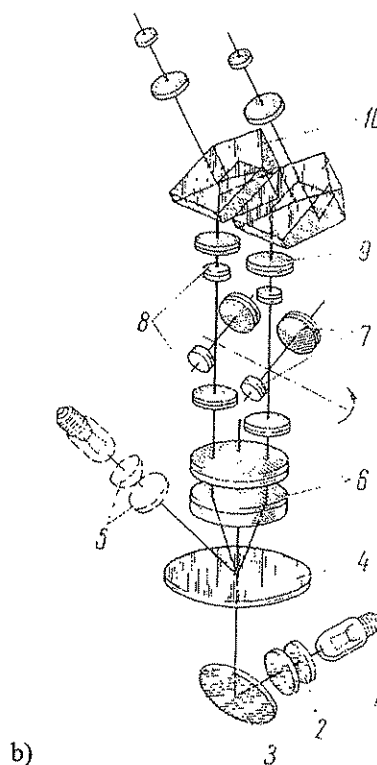
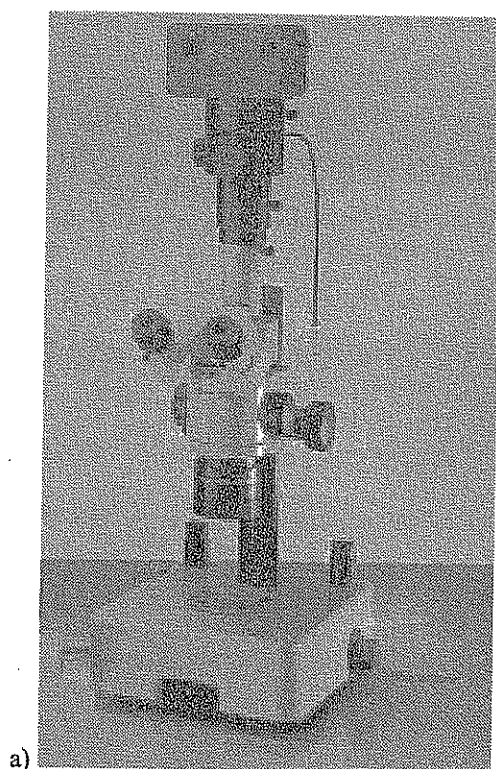
Stereobinokularni mikroskop male moći uvećanja predstavlja prvi i osnovni, a često i jedini, uređaj na pogonu ili laboratoriji za PMS koji se ujedno i najčešće koristi. Danas u svetu postoji niz proizvođača ovih mikroskopa, sa različitim namenama (biološki, medicinski) a svi oni mogu dobro poslužiti i pri identifikaciji i karakterizaciji minerala. Svakako da dobar mikroskop ima i nekih specifičnosti koje treba imati na umu pri nabavci nove opreme za ove potrebe. *Monokularni mikroskop* dolazi u obzir jedino kao džepna varijanta terenskog mikroskopa (malih gabarita, mase). U laboratorijskim uslovima je neophodan *binokularni mikroskop*, kako bi se mineralna zrna posmatrala u tri dimenzije (oblici zrna, sastav, oslobodenost itd.). Mikroskop treba da sadrži *nekoliko pari okulara* sa različitim uvećanjima i standardno uvećanje, obično je to 10x, da poseduje različite okularske dodatke – končaniće, okular mikrometersku skalu, mikrometersku mrežicu i sl. Mikroskop treba da poseduje i različita uvećanja *objektiva*, koja bi morala biti lako izmenljiva – rotacijom ploče nosača više objektiva, ili da poseduje uređaj za zumiranje, kakve danas imaju svi noviji mikroskopi; da je opremljen dobrim izvorom svetlosti – halogene sijalice, osvetljavanje optičkim vlaknima a koji mogu biti ugrađeni u samo telo mikroskopa ili biti samostalna celina. Pored bele svetlosti od pomoći su i obojena svetla (nekoliko filtera sa žutom, zelenom i crvenom bojom), kao mogućnost posmatranja pri ultravioletnoj svetlosti kako bi se pratila eventualna fluorescencija minerala. Dobri mikroskopi imaju ugrađen refleksi 35 mm fotografski aparat ili polaroid kameru, kako bi se sprovedena ispitivanja mogla i dokumentovati. Bolje opremljeni imaju ugrađenu TV–kameru, vezanu za monitor i eventualno za videorekorder i personalni kompjuter. Uz odgovarajući programski paket ovakva konfiguracija čini jedan jednostavniji analizator slike, ili video istraživačku stanicu. Što se tiče samog stočića mikroskopa, on treba da je dovoljno širok, da postoji mogućnost montaže različitih tipova mehaničkih x–y stočića ili stočića vođenih relejnim motorima.

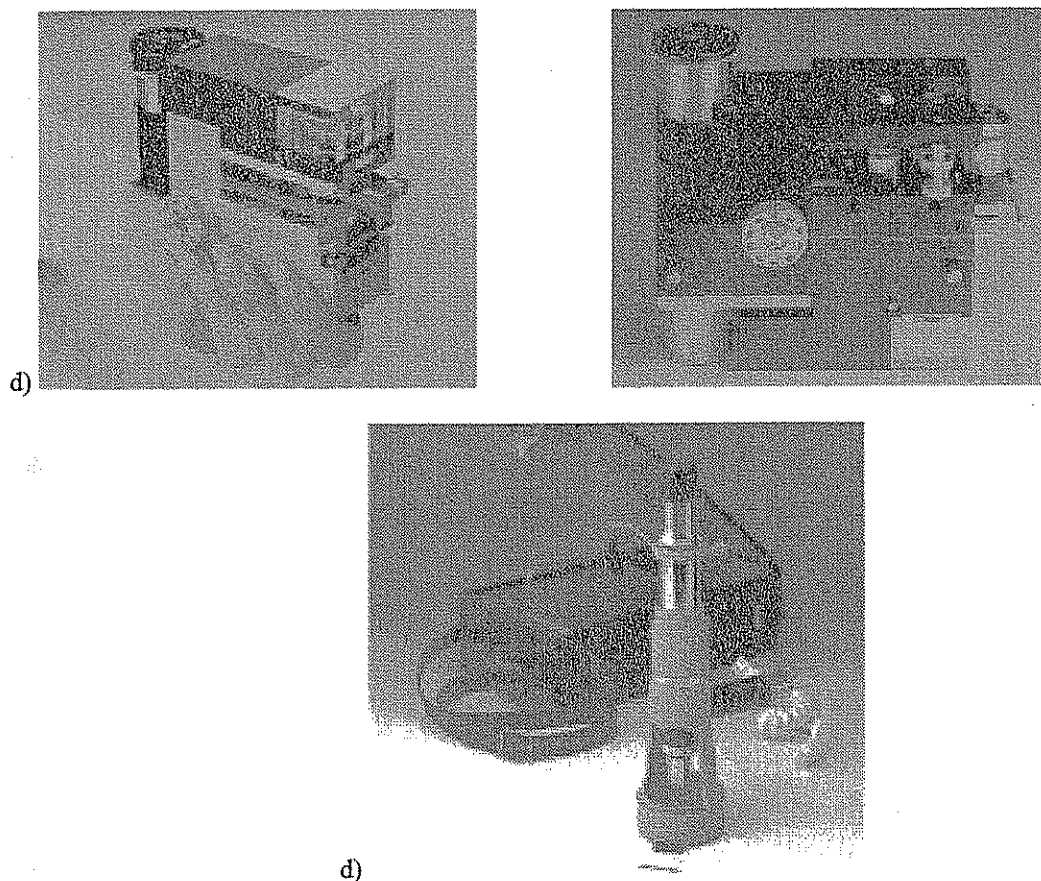
Optička šema stereobinokularnog mikroskopa (Sl.4.16 b), za propuštenu i za reflektovanu svetlost sastoji se od sledećih

osnovnih elemenata: izvor svetlosti (1) sa sistemom sočiva (2, 5) kao specijalnog kolektora svetlosti, može da obasjava preparat odozdo ili /i odozgo. Svetlosni snop, prošavši kroz staklenu pločicu sa prozirnim mineralima, ili se reflektujući sa metalne ploče kod neprozirnih metalnih minerala, prikupljen je sistemom sočiva - objektiv (6) sa relativno većom žižnom daljinom (kako bi se mogli osmotriti i veći komadi sirovine). Snop svetlosti zatim prolazi kroz dva para (7, 8) sistema sočiva, koje je moguće (rotiranjem na jednoj osovinu) uključivati i time dobiti različita uvećanja u vidnom polju mikroskopa. Danas savremeni stereobinokulami mikroskopi imaju deo sa ZOOM-om za trenutno uvećanje, za različite jačine, bez da posmatrač mora posebno za svaku promenu uvećanja da izoštrava vidno polje. Dalje svetlosni snop prolazi kroz par ahromatskih sočiva (9) sa velikom žižnom daljinom. Prolaskom svetlosti sa oformljenom slikom kroz prizme (10) dospeva u sam okular. Prizme prelamaju svetlosni snop pod određenim uglom i pružaju konforan rad posmatračima, a istovremeno omogućuju i podešavanje rastojanja između očiju za različite posmatrače. Bolje opremljeni mikroskopi imaju niz promenljivih okulara, ili imaju i mogućnost promene objektiv.



Sl. 4.15. Mehanički stočići različite konstrukcije.





Sl. 4.16 Oprema za identifikaciju minerala: a-stereobinokularni mikroskop; b-optička šema rada; c-izvori svetlosti; d-tipovi sklopivih i prenosivih mikroskopa.

Takođe je neophodno da mikroskop ima mogućnost osvetljavanja preparata odozgo i/ili odozdo. Sa ovako opremljenim uređajem moguće je osmatrati preparat – zrna minerala na tamnoj osnovi–pozadini ili na svetloj osnovi.

Svakako ovde treba napomenuti, iako to ne čini sam mikroskop odnosno njegov pribor, vrlo je korisno napraviti sopstvenu kolekciju–zbirku, monomineralnih frakcija, kao etalona minerala, sa ležišta čiju rudu ispituju, zatim minerala iz šireg područja kao i različite vidove istih minerala iz različitih ležišta (npr. piriti Bora, Blagodata, Velikog majdana se već na prvi pogled u mnogome razlikuju).

Etalone čuvati hermetički zatvorene, kako bi se sprečila eventualna oksidacija a time i otežala identifikacija prema karakterističnim obeležjima. Svakako da je konformnije ukoliko su uzorci etaloni usko klasirani, pa imamo mogućnost posmatranja osobina zrna pri različitoj krupnoći.

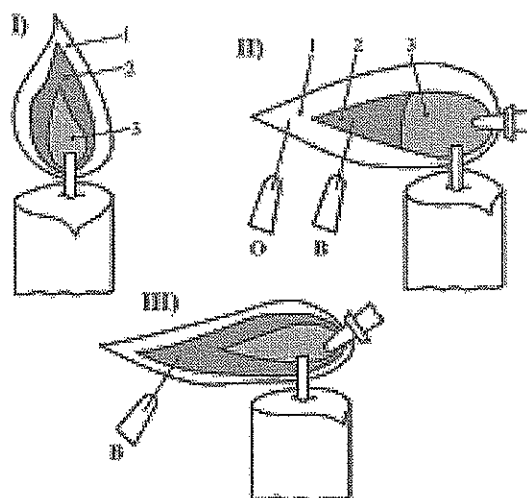
4.2.30 KVALITATIVNE HEMIJSKE ANALIZE

Testovi kvalitativne hemijske analize mogu, uz vrlo malo pribora i hemikalija takođe da se izvedu uz pomoć mikroskopa i na terenu. Za ove testove su neophodni:

- staklena ili metalna duvaljka i špiritusna lampa (ili plamen sveće). Princip metoda sastoji se u intenziviranju i ubrzanoj oksidaciji odnosno redukciji nekog hemijskog elementa, sastojka ispitivanog minerala, uz posmatranje i praćenje reakcije (obojenje plamena), koji je karakterističan za dati elemenat, pri dija-

gnosticiranju. Svakako da se osnovne komponente, koje čine najveći deo stenskog materijala, odnosno sirovine, kao što su Na, K, Ca, Mg ili Al mogu odrediti na ovaj način ali sa znatnim poteškoćama. Za ove testove je još neophodan sledeći pribor:

- špiritusna lampa, pincete;



Sl. 4.17 Ilustracija ispitivanja u plameniku: I–normalan plamen sveće; II–duvaljkom izazvan oksidizirajući plamen i III–duvaljkom izazvan redukcioni plamen. 1–zona oksidacije; 2–redukciona zona; 3–zona lošeg sago-revanja; O–tačka najintenzivnije oksidacije; B–tačka najintenzivnije redukcije.

- manji komad drvenog uglja, za izvođenje opita pri redukcionim uslovima sredine. Preporučuje se parče uglja dimenzija 10x5x5 cm, tako da mu gornja strana bude ravna i glatka;
- parče platinske žice debljine 0,3–0,5 mm i dužime 50 mm, koja se zaliva na vrh staklenog štapića, i uz pomoć koje se unosi materija u plamen;
- staklena cevčica dužine 10–15 cm i debljine 0,5 cm za ispitivanje uzoraka u plamenu—otvorena za oksidacione uslove, odnosno zatvorena za ispitivanja bez prisustva vazduha;
- ahatni ili porculanski avan za usitnjavanje;
- parče srebrne trake, ili parče fotografskog papira (za utvrđivanje prisustva ili ne sumpora);

- filter papir za praćenje obojenja određenih rastvora;
- stakleni ili porcelanski sud za rastvaranje minerala;
- listići lakmusovog papira;
- nekoliko staklenih pločica—predmetna stakla, kao i stakleni štapić za mešanje.

Od hemijskih reagenasa preporučuju se kao najneophodniji sledeći:

boraks $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (u prahu)
 fosfat $\text{NH}_4\text{NaHPO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (u prahu)
 natrijum bikarbonat NaCO_3 (u prahu)
 kobalt nitrat $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ (1:20 rastvor)
 hlorovodonična kiselina HCl (1:2 rastvor)

4.3 POLARIZACIONI RUDNI MIKROSKOP - RAD PRI REFLEKTOVANOJ SVETLOSTI

4.3.1 ISPITIVANJA MINERALNIH SIROVINA RUDNIM POLARIZACIONIM MIKROSKOPOM

Predmet rudne mikroskopije je identifikacija i određivanje rudnih minerala pod mikroskopom na osnovu njihovih optičkih i drugih fizičkih karakteristika. Poznato je da su svi metalni minerali (samородni metali, sulfidi, oksidi i dr.) neprovidni, nepropuštaju svetlost te se njihovo ispitivanje ne može vršiti u propuštenoj svetlosti već samo u reflektovanoj svetlosti.

Neprovidni minerali, za razliku od providnih i prozračnih, odlikuju se sa relativno visokim koeficijentima absorpcije svetlosti, oni odbijaju svetlosne zrake na različite načine, zavisno od veličine koeficijenta absorpcije ispitivanih minerala. Optički efekti koji se tom prilikom manifestuju koriste se kao važna dijagnostička obeležja. Odbijena svetlost je linearno polarisana, odnosno vibracije se vrše u jednoj ravni. Odbijena svetlost se dobija pomoću dela mikroskopa - opak iluminatora, koji je pridodat i ugrađen na običan polarizacioni mikroskop.

Postoje različite konstrukcije rudnih mikroskopa, među kojima se razlikuju po sledećem:

- konstrukciji opak iluminatora i njegovog korišćenja (mikroskopi sa ugrađenom staklenom pločicom, prizmom ili poluprozirnim ogledalom);
- svetlosnom izvoru i njegovim delovima (ugrađen u opak iluminatoru ili izvan njega kao poseban dodatak)
- konstrukciji objektiva (sa sočivima za osmatranje samo poliranih preparata, za osmatranje poliranih i petrografskih preparata ili osmatranje zrnastog materijala).

Kod dijagnosticiranja minerala rudnim mikroskopom primenjuju se različite metode kojima se proučavaju njihove fizičke i hemijske osobine.

Fizičke osobine rudnih minerala mogu se razvrstati u dve grupe:

- optičke osobine (boja, sposobnost odbijanja svetlosti ili moć refleksije, birefleksija, efekat polarizacije, unutrašnji refleksi);

- fizike osobine (kristalomorfne karakteristike zrna ili agregata minerala, tvrdina, magnetičnost itd.)

Hemijske osobine rudnih minerala se izučavaju mikrohemijskim metodama dijagnosticiranja:

- strukturnim i dijagnostičkim korodovanjem, i
- primenom mikrohemijskih reakcija (kao vrlo brz, pouzdan i jeftin metod pri dijagnosticiranju minerala - elementa nosioca, kod različitih proizvoda PMS).

4.3.2 ZADACI RUDNOMIKROSKOPSKIH ISPITIVANJA

Laboratorijska ispitivanja mineralnih sirovina pri mineraloškoj analizi obuhvataju sledeće zadatke:

Prvi ima cilj da se utvrdi i prouči materijalni sastav (mineralni i elementarni) metalnih ili nemetalnih minerala.

Drugi zadatak obuhvata prikupljanje podataka i informacija o morfološkim, genetskim, tekturno-strukturnim karakteristikama minerala i same sirovine, kao i prikupljanju podataka o paragenetskim i genetskim odnosima, sukcesivnosti nastajanja mineralnih vrsta sa ciljem rekonstrukcije genetskih procesa u pojedinim stadijumima, fazama i podfazama obrazovanja ležišta mineralnih sirovina.

Deo ovih ispitivanja pružaju neophodne podatke pri daljoj razradi procesa pripreme i koncentracije mineralnih sirovina.

Laboratorijska ispitivanja mineralnih sirovina sugerišu i izbor odgovarajućih laboratorijskih metoda koje će u što kraćem vremenu dati što tačnije rezultate o mineralnom i elementarnom sastavu ispitivane sirovine.

Laboratorijske metode ispitivanja mineralnog sastava sirovina se prema svojoj nameni, uslovno mogu podeliti u tri grupe:

- metode dijagnostičkih ispitivanja mineralnih vrsta i asocijacija (SEM, TEM i sve druge savremene metode)
- metode ispitivanja elementarnog kvalitativnog i kvantitativnog sastava mineralnih komponenata i
- predlog metoda za razdvajanje, separaciju monomineralnih frakcija iz ispitivane sirovine.

4.3.3 OPTIČKE METODE DIJAGNOSTIČKIH ISPITIVANJA

Osnovna grupa optičkih metoda obuhvata ispitivanja mineralnih sirovina u vidljivom delu spektra (od 440 do 750 nm), odnosno beloj svetlosti.

Razlikujemo metode ispitivanja prozračnih i slabo absorbirajućih minerala, u propuštenoj polarisanoj svetlosti. Instrument je polarizacioni mikroskop za propuštenu svetlost - *petrografski mikroskop*, sa dodacima za kvantitativno određivanje pojedinih optičkih osobina minerala. Ove metode imaju široku primenu u ispitivanju nemetaličnih mineralnih sirovina.

Drugu grupu čine metode ispitivanja poluprozirnih odnosno slabo absorbirajućih i absorbirajućih neprovi-

dnih minerala u odbijenoj polarisanoj svetlosti. Instrument je polarizacioni mikroskop za odbijenu svetlost - *rudni mikroskop* sa dodacima za kvantitativna određivanja refleksije, utiska boje birefleksije, mikrotvrđine, modalnog sastava i dr. Ove metode se koriste za ispitivanja metalnih mineralnih sirovina (Sl. 4.18).

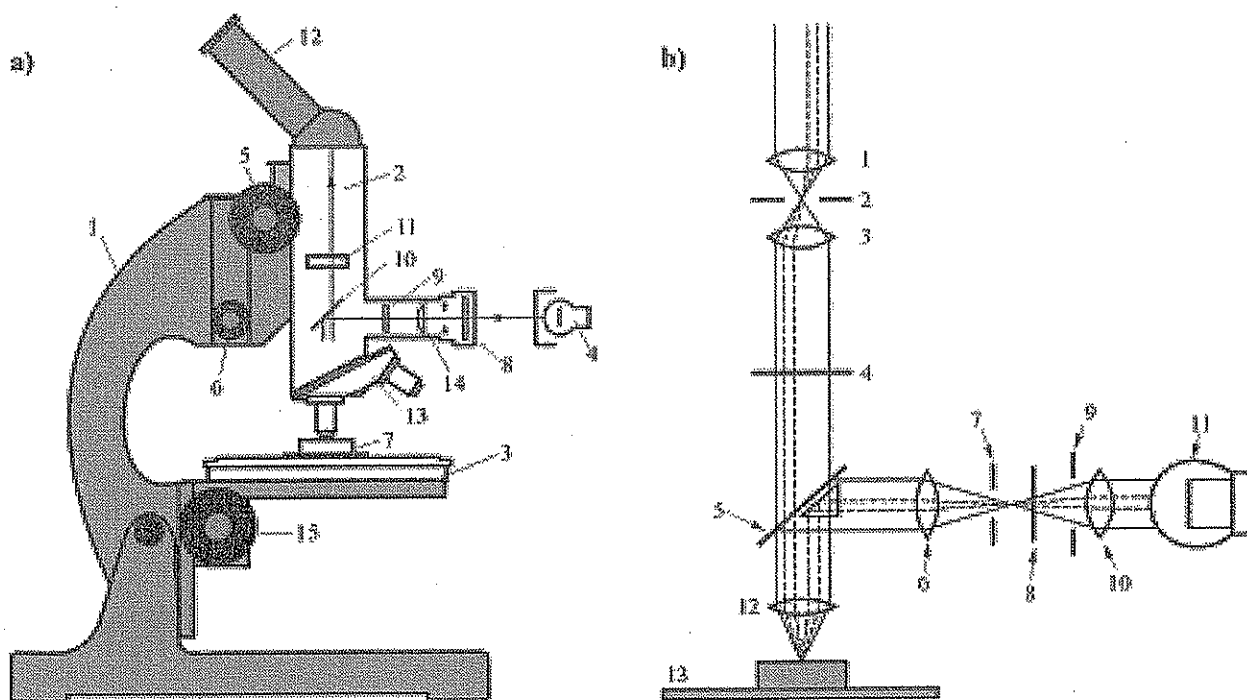
Klasične mikroskopske metode doživljavaju intenzivan razvoj, jer se u upotrebu uvode novi instrumenti i uređaji za merenja različitih fizičkih konstanti mineralnih komponenata koje izgrađuju sirovine, kao i za određivanja kvalitativnog i kvantitativnog sastava sirovina. Ovi novi instrumenti u svakom slučaju u svom sastavu imaju ugrađeni mikroskop (Video istraživačka stanica, analizator slike, laserski mikrospektralni analizator, infracrveni mikroanalizator i dr.)

4.4 OPŠTA KONSTRUKCIJA I RAD RUDNOG MIKROSKOPA

4.4.1 FOKUSIRANJE I CENTRIRANJE MIKROSKOPA

Mikroskop je potrebno pre upotrebe brižljivo fokusirati prema svom oku, kako bi se bez naprezanja izvršila ispitivanja. Pre postupka centriranja, iz tubusa mikroskopa izvaditi okular i fokusirati ga na beskonačnost, gledajući kroz njega udaljeni predmet. Zavrtanjem na samom okularu pomerati sočivo dok se končаница u okularu ne izoštre tj., dok se njihove konture jasno ne vide. Zatim se fokusira predmet, koji je predhodno stavljen na predmetni stočić mikroskopa. Druga faza pripreme mikroskopa za rad je centriranje. Kod rudnih mikroskopa, centriranje se vrši pomoću zavrtneva ugrađenih na

objektivu ili pomoću zavrtneva koji su sastavni deo rotacionog mikroskopskog stočića. Postupak je sledeći: u centar končаница postavlja se karakteristično mineralno zrno, lako prepoznatljivo i većih dimenzija. Stočić mikroskopa se zatim rotira sve dotle dok se odabrano mineralno zrno ne izvede na maksimalno rastojanje od centra končаница. Iz ovog položaja, se uz pomoć zavrtneva (na objektivu ili predmetnom stočiću) pomera predmet - zrno na polovinu rastojanja od centra končаница. Druga polovina puta se lagano rukom pomera do samog centra končаница. Ovaj postupak se ponavlja sve dotle dok zrno smešteno u centru končаница ne prestane da se udaljava pri rotaciji predmetnog stočića odnosno ostaje u centru končаница (Sl.4.19).



Sl. 4.18 Prikaz rudnog polarizacionog mikroskopa: **a** - osnovni delovi (1-telo mikroskopa; 2-tubus; 3-rotacioni stočić mikroskopa; 4-izvor svetlosti; 5-grubo izoštravanje; 6-fino izoštravanje; 7-rudni preparat; 8-polarizator; 9-dijafagma; 10-refraktor; 11-analizator; 12-okular; 13-objektiv; 14-sabirna sočiva; 15-podizač stočića), i **b** - optička šema (1 i 3-sočivo okulara; 2-fiksna dijafragma; 4-analizator; 5-reflektori, opakuluminator - stakleno polupropusno ogledalo ili ogledalna prizma; 6-sočivo; 7-dijafagma vidnog polja; 8-polarizator; 9-aperturna dijafragma; 10-sočivo kolektora; 11-izvor svetlosti; 12-objektiv; 13-rudni preparat).

4.4.2 OBJEKTIVI

Objektivi mikroskopa se mogu klasificirati prema tipu sočiva koja sadrže (ahromatska, apohromatska, fluoritna), njihovom uvećanju i numeričkoj aperturi te da li su za osmatranje u imerziji ulju ili vazduhu. Ponekad su i značajna daljina ili radna distanca od posebnih karakteristika.

Objektivi sa ahromatskim sočivima su najuobičajeniji koje nalazimo kod većine mikroskopa. Oni su korigovani za sferičnu aberaciju za samo jednu boju, najčešće žuto-zelenu, a za hromatsku aberaciju za dve boje. Tako, kada se koristi bela svetlost, u tom slučaju je moguća pojava obojenog ruba, ivice slike (vidnog polja), i ukoliko se za mikrofotografisanje koristi crno beli film, taj efekat će doprineti izvesnoj difuziji svetlosti. Ukoliko se koristi monohromatski izvor svetlosti (posebno zeleno svetlo) slika će biti kako na crno belom filmu tako i u oku mnogo oštija (Sl. 4.20 a).

Objektivi apohromatskog tipa su mnogo bolji i razume se mnogo skuplji. Oni su korigovani za sferičnu aberaciju na dve boje (plavu i zelenu) a za hromatsku aberaciju za primarne spektralne boje crvenu, zelenu i plavu. Ovakva sočiva objektivu pružaju jasnu i ostru sliku a za kolor fotomikroskopiju su daleko najkvalitetniji. Da bi se dobile najbolje performanse od apohromatskih sočiva neophodno ih je koristiti u sprezi sa "kompenzacionim okularima" (Sl. 4.20 b).

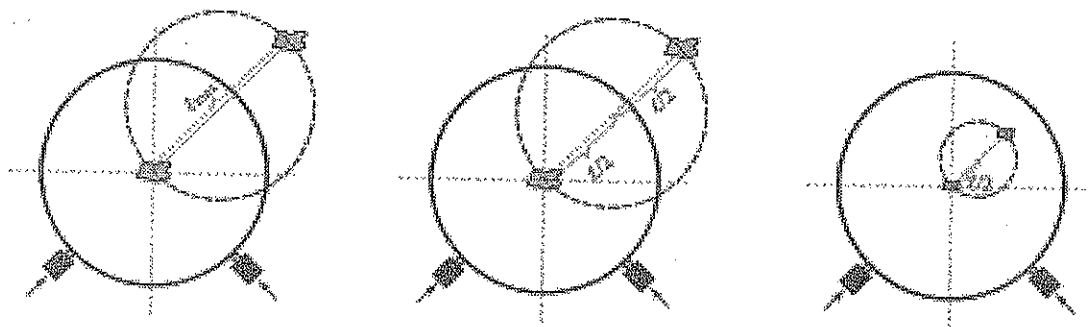
Fluoritna sočiva (poznata kao semiapohromatska) su kompromis u stvarima kao što je cena i kvalitet u odnosu na predhodna dva tipa sočiva. Fluoritska sočiva se moraju koristiti sa kompenzacionim okularima za najbolje performanse. Većina objektivu daje primarne slike u zakrivljenoj ravni, no međutim sa dodatnom korekci-

jom ovo može da se izvede tako da se dobije ravna primarna slika. Ovakav tip sočiva proizvodi "ravne slike" ili "planarne" i naročito su pogodni za široka vidna polja a pogotovu za fotomikroskopiju. Uvećanje objektivu je stepen za koji je slika uvećana nakon prolaska kroz objektiv. Uvećanja se obeležavaju kao 5x, 10x, 20x, pa sve do oko 125x. Primeri tipova objektivu, prema svojim kosntrunkcijama i razmeštaju sočiva u njima dati su na Sl.4.20.

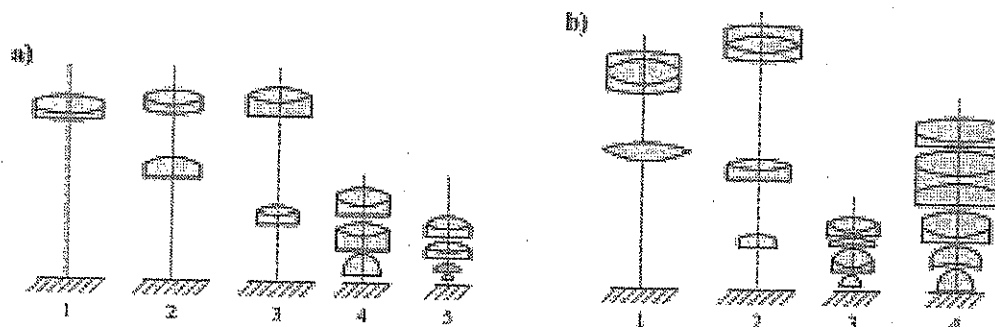
Numerička apertura (N.A.) je mera mogućnosti da se prepoznaju fini strukturni detalji u specimenu i određuje dubina fokusiranja kao i koristan opseg uvećanja. Matematički ona leži u rasponu 0,04 do 1,3 i ekvivalentna je proizvodu refraktivnog indeksa (n-indeks preloma) za onaj medijum u kome sočivo radi i sinusu ugla (μ) koji je jednak jednoj polovini ugaone aperture tog sočiva.

$$N.A. = n \times \sin \mu$$

Vrednosti N.A. su ugravirane na svakom objektivu. Ahromatski objektivi uvećanja 10 puta najčešće imaju N.A. od 0,20 a oni objektivi sa uvećanjem 20 puta N.A. iznosi 0,40. Apohromatski objektivi imaju više vrednosti za N.A. od ahromatskih. Gornje granične vrednosti za N.A. kod objektivu za osmatranje u vazduhu ("suve") iznosi 0,95, što odgovara uglu od 70°, kao maksimalnoj vrednosti ugla upadne svetlosti prema površini specimena (odnosno ugaona apertura punog ugla je u tom slučaju 140°). Maksimalne vrednosti N.A. objektivu za posmatranje u imerziji ulju sa indeksom preloma 1,5 iznosi oko 1,4. Primeri veze između ugaone aperture, uvećanja i slobodne radne distance pojedinih objektivu ilustrovana je na slici 4.21 i tablici 4.13.



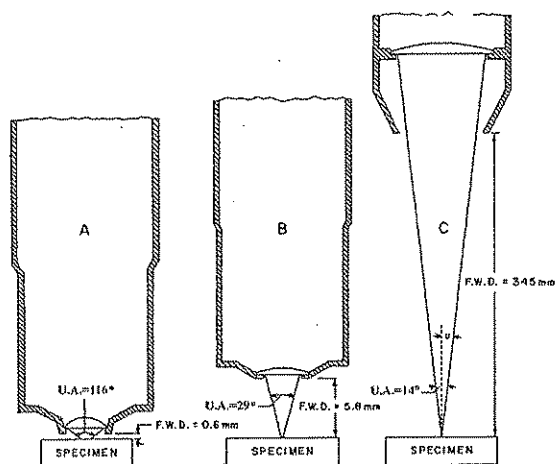
Sl.4.19 Centriranje rudnog mikroskopa (1/2 manuelno, 1/2 zavrtnjima).



Sl. 4.20 Tipovi objektivu prema konstrukciji: a-ahromatski objektivi (1-sa najmanjim povećanjem i najmanjom numeričkom aperturom; 2 i 3-dvodelni objektivi; 4-trodelni objektivi sa srednjim povećanje za osmatranje u vazduhu ili vodi; 5-četvorodelni objektivi za velika povećanja i rad u imerziji ulju ili vazduhu); b-apohromatski objektivi (1-najmanje uvećanje dvodelni lepljeni; 2-malo i srednje uvećanje, trodelni sa prvim frontalno ravnim jednostrukim a druga dva lepljena; 3-velika povećanja za vazduh ili imerziju ulje, četvorodelni; 4-imerzini petodelni objektivu dvostruki i trostruki lepljeni od kojih mogu biti i od kristala litijumfluorida).

Tablica 4.13 Karakteristike pet objektiva koji se najčešće koriste u rudnoj mikroskopiji

Nominalno uvećanje	Ugaona apertura (A.A.) (Angular Aperture)	Numerička apertura (N.A.) (Numerical Aperture)	Radno rastojanje u mm (F.W.D.) (Free Working Distance)	Žižna daljina (u mm)
5x (uljni)	7°	0.09	0.35	50
5x (vazduh)	10°	0.09	12	50
10x (vazduh)	23°	0.20	14	25
20x (uljni)	31°	0.40	0.23	12.5
50x (uljni)	69°	0.85	0.28	2.0



Sl.4.21 Tipovi objektiva – poređenja prema numeričkoj odnosno ugaonoj aperturi, rasponu uvećanja i dubini fokusiranja; A–objektiv velikog uvećanja, ugaona apertura 116°, radno rastojanje 0,6 mm; B–srednje uvećanje, ugaona apertura 29°, radno rastojanje 5,8 mm; malo povećanje, ugaona apertura 14°, radno rastojanje 345 mm.

Većina objektiva koji su u svakodnevnoj upotrebi, sa malim i srednjim uvećanjima u rudnoj mikroskopiji, rade sa sočivima za posmatranje u vazduhu ("suvi"), tj. projektovani su tako da je medijum između specimena i objektiva vazduh.

Treba napomenuti da su objektivi namenjeni posmatranju u propusnoj svetlosti korigovani na uticaj "pokrovnog stakla" od 0,17 ili 0,18 mm kojim su pokriveni petrografski preparati. Ova sočiva mogu davati nešto slabiju ili deformisaniju sliku kada se koriste za osmatranje u reflektovanoj svetlosti. Imerzionim objektivi se uglavnom koriste u rudnoj mikroskopiji, odnosno za osmatranje u odbijenoj svetlosti a posebno kada su potrebna velika povećanja i visoka rezolucija. Za rad ovog tipa objektiva neophodna je kap imerzionog ulja (najčešće sa indeksom preloma 1,515) koja se postavlja između površine specimena i samog objektiva, mada postoje i tipovi koji kao imerzionu tečnost mogu da koriste vodu. Prisustvo imerzionog medijuma (ulja ili vode) redukuje stepen reflektovane svetlosti sa površine specimena, a istovremeno pojačava efekat zasićenosti boja (razlikovanje boja), smanjuje rasipanje odbijene, povratne svetlosti i uopšte omogućava osmatranje efekata niske anizotropije i slabe birefleksije koje inače nije moguće primetiti sa objektivima za vazduh ("suvim").

Svi imerzionim objektivi imaju vrlo kratku radnu distancu, stoga se preporučuje posebna pažnja pri svakom fokusiranju da ne bi došlo do oštećenja objektiva pri

"sudar" sa površinom specimena. Imerziono ulje se nakon upotrebe obavezno uklanja rastvaračima sa objektiva u suprotnom biva zaprljano česticama prašine i sušenjem ulja na objektivu. Sisteme okulara srećemo bilo kod monokularnih ili binokularnih mikroskopa. Ukoliko je moguće uvek se preporučuju binokularni mikroskopi a okulari treba tako da su podešeni da se u vidnom polju savršeno preklape rubovi dveju slika polja. Jedna od prvih operacija štelovanja mikroskopa je i podešavanje okulara tako da končanica ili mikrometerska graduisana skala budu jasno vidljivi u vidnom polju.

4.4.3 OKULARI

Okularni sistemi sočiva na mikroskopima služe za povećanje primarne slike formirane objektivima i čine je vidljivom za oči posmatrača. Većina mikroskopa je opremljena sa "Hajgensovim" okularima i uvećanjima 5x do 12x koji sadrže po dva sočiva a u međuprostoru ugrađenu dijafragmu. Dijafragma obično ima ugrađene dve, međusobno pod pravim uglom ukrštene, tanke niti-končanice ili mesto njih može biti ugrađen okular mikrometerski disk sa izgraviranom baždarenom duži odnosno disk sa mikrometerskom mrežicom kao šablonom a obe su pogodne za merenje veličine zrna ili kvantitativna snimanja.

Okulari konstruisani za fotomikroskopska snimanja nemaju ugrađene ni končanicu ni mikrometersku skalu i tako su konstruisani da budu "kompenzacijski" tip koji će eliminisati hromatsku aberaciju. Veliki istraživački mikroskopi imaju tzv. širokougaone okulare i pružaju jedan konforan rad na širokom i jasnom vidnom polju.

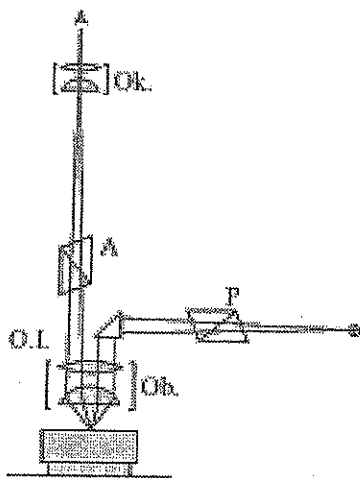
4.4.4 ČUVANJE I ODRŽAVANJE SOČIVA

Objektivska i okularna sočiva su sklona prikupljanju prašine kao i nezgodnim kontaktima objektiva sa površinom specimena a okulara sa našim očima odnosno trepavicama. Na taj način dolazi do njihovog zaprljanja stvarajući pri osmatranju efekat "cvetanja i zamagljenja". Sočiva se ne smeju čistiti grubim tkaninama ili papirnim maramicama već odgovarajućim mekim materijalima od finog prirodnog vlakna i odgovarajućom vakuum četkicom. Pri ovom radu treba imati u vidu da su sočiva i najskuplji delovi jednog mikroskopa.

4.4.5 POLARIZATOR I ANALIZATOR

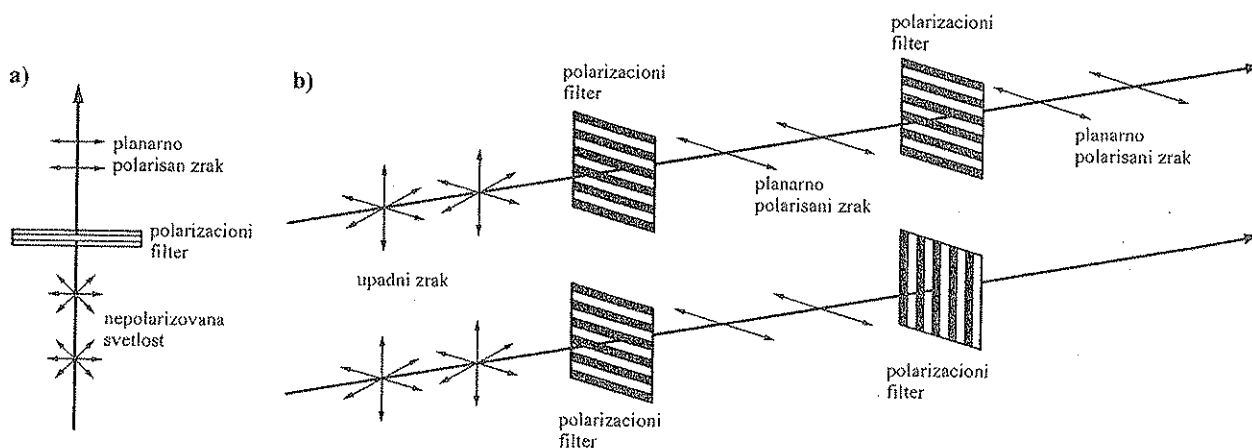
Polarizator je kod standardnog rudnog mikroskopa smešten unutar iluminacionog sistema, a između izvora svetla i sočiva kolektora ali može ponekad da bude smešten i između dijafragmi (Sl.4.22). To je ili kalcitska prizma ili, mnogo češće, polaroidna pločica, koja jedino

dozvoljava prolaz planarno ili "linearno" polarisanom svetlu najčešće orijentacije pravca S-J (Sl.4.23 i Sl. 4.24).



Sl.4.22 Optička šema rudnog polarizacionog mikroskopa – mesto i uloga polarizatora i analizatora: P-polarizator; OI-opak-iluminator; OB-objektiv; A-analizator; OK-okular.

Kod standardnih petrografskih izučavanja polarizator i analizator su međusobno upravni (perpendikularni) i fiksirani. Međutim, kod rudnog polarizacionog mikroskopa je mnogo korisnije i komfornije ukoliko su polarizatori "raskršteni" za nekoliko stepeni od pozicije ugla od 90° (kada su potpuno "ukršteni"). Ovo naročito dolazi do izražaja kod izučavanja slabo anizotropnih minerala ili kod umereno anizotropnih zrna ako se ova nalaze uklopljena u osnovi izrazito anizotropnih minerala. Blago, sasvim neznatno "raskrštanje" postiže se rotacijom pokretnog analizatora, ukoliko je tehnički izvodljivo, ili neznatnim pomeranjem (za 3-5°) polarizatora od međusobno upravne pozicije. Rotiranje mikroskopskog stočića da bi se video efekat anizotropizma i zatamnjenja (zagašenja) nije uvek najpouzdanije usled kombinacija pomeranja i različitog anizotropizma zrna koje se ispituje. Praktično pri promatranju ukrštenim polarizatorima anizotropni minerali daju utisak promene intenziteta reflektovane svetlosti kao i promenu boje. Ove promene boje nazivaju se polarizacione boje (Tablica 4.14). One nisu presudno korišćene, niti su odlučujuće u onoj meri u kojoj bi mogle, ali su i te kako korisne kao dodatna karakteristika pri identifikaciji minerala. Štaviše, kao i sa svim osobinama koje proizvode boju javlja se čitav niz poteškoća pri interpretaciji i registrovanju, među kojima su:

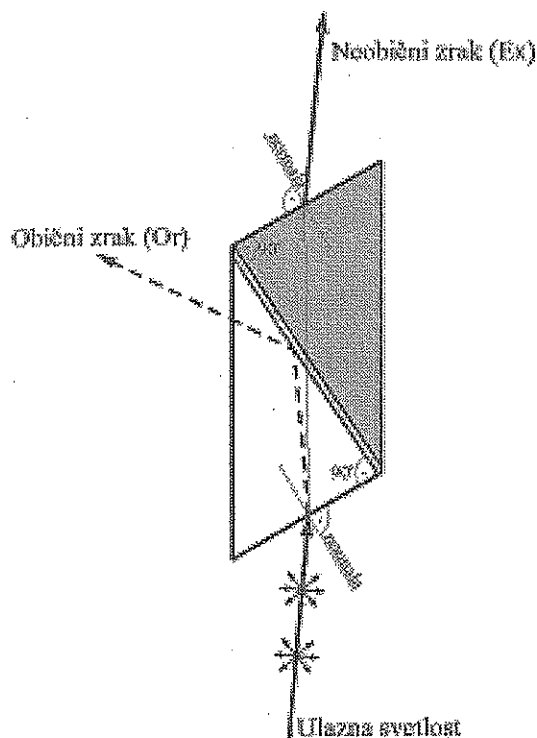


Sl.4.23 Ilustracija rada polarizacione pločice-filtera: a-izgled polarizatora – pločice sa upadnim nepolarisanim svetlosnim zrakom i izlaznim planarno (u ravni) polarisanim zrakom.; b-rad polarizatora i analizatora; prvo, upadni svetlosni snop se planarno polariše; drugo, potpuno "zagašenje" svetlosnog zraka ukrštenim polarizacionim filterima.

Tablica 4.14 Primeri polarizacionih boja nekih rudnih minerala

Savršeno ukršteni nikoli		Neznatno raskršteni nikoli
Boja polarizacije	Mineral	Promena u boji polarizacije
Siva	Ilmenit, magnetit	
Mrko siva	Pirargirit, silvanit	Svetlije boje
Zelenkasto siva	Hematit	
Žuto mrk	Volframit	
Oranž mrka	Halkoerit	
Ružičasta	Molibdenit	Ružičasto bela
Oranž	Kovelin	
Zelena	Markasit, cinabarit, kuprit	Zelenkasto plava
Plava	Kubanit, gerit	
Žuta	Milerit	Žuto plava
	Grafit	Žuta do oranž žuta
	Pirokuzit	Mrko žuta

1. Subjektivnost u posmatranju i deskripciji prirode određenih boja.
2. Velike razlike u boji pri radu sa više različitih mikroskopa.
3. Promene boje zavisno od intenziteta osvetljenosti; gde je dobra i konstantna osvetljenost najbitnija.



Sl.4.24 Ilustracija rada kalcitske (Nikolove) prizme pri polarizaciji svetlosti; nepolarisani svetlosni zrak se deli na običan (Or) zrak i neobičan (Ex) zrak odnosno polarisanu u ravni svetlost.

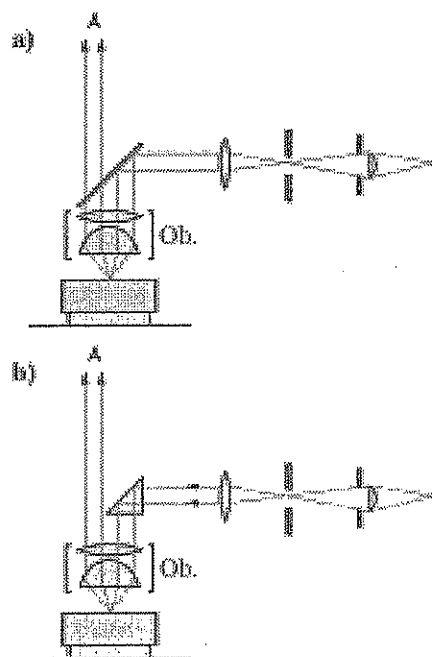
Za osmatranje pravih polarizacionih boja sam mikroskop mora biti postavljen sa potpuno ukrštenim polaroidima. Takođe se striktno treba pridržavati i sledeće procedure:

1. Odabrati objektivne bilo od 20x ili 40x.
2. Fiksirati vidno polje na sveže polirani presek tesalnog minerala.
3. Skinuti okular.
4. Uključiti analizator.
5. Videće se tačno centriran crni krst na svetloj osnovi. U suprotnom polarizatori nisu odgovarajuće ukršteni.
6. Potrebno je rotirati u jednom ili drugom pravcu jedan od polarizatora dok se ne primeti pomenuti crni krst.
7. Vratiti okular i ubeležiti tačan položaj polarizatora u kome bi oni trebali ostati, premda se kao što je već rečeno za slabo anizotropne minerale vrši neznatno "raskršćavanje" polarizatora. (Tablica 4.14)

4.4.6 REFLEKTORI - KONSTRUKCIJA I NJIHOVO KORIŠĆENJE

Reflektori predstavljaju kritičnu i bitnu komponentu rudnih mikroskopa, jer predstavljaju element - sredstvo pomoću koga se snop svetlosti vertikalno usmerava na poliranu površinu specimena. Postoje dve vrste reflektora:

a) a – reflektor tipa staklene ploče - polupropusnog ogledala i b – tipa staklene prizme za prekrivanje odnosno skretanje i reflektovanje polovine upadnog svetlosnog snopa (Sl.4.25 a i b). Uobičajeno je da mikroskopi imaju dva tipa reflektora (opak-iluminatora) postavljenih na horizontalnom klizaču i alternativno se mogu koristiti, jedan ili drugi. Kada se koristi kao reflektor staklena ploča - polupropusno ogledalo, deo svetlosti iz iluminatora se usmerava nadole preko objektiva na površinu preparata a deo svetlosti prolazi na reflektor i gubi se (Sl.4.25 a). Svetlosni snop koji je prošao na dole se reflektuje i vraća sa površine minerala kroz objektiv sve do ploče reflektora. U toj tački (na toj ravni) deo svetla prolazi nagore kroz ploču reflektora sve do tubusa okulara, a deo se reflektuje nazad prema sistemu iluminatora i gubi se. U idealnom slučaju, ogledalna staklena ploča reflektora treba da reflektuje nadole svu upadnu količinu svetla iz iluminatora, na specimen a zatim sva količina se reflektuje sa površine poznatim putem do okulara. Međutim, stvarna efikasnost refleksije - ogledalne staklene ploče, reflektora, je samo oko 25 % od ukupne svetlosti iz iluminatora prolaskom kroz reflektor konačno do okulara. Ova efikasnost je zadovoljavajuća za većinu izvora svetlosti, čak šta više, samo sa ovim tipom reflektora i ako je tačno vertikalno centriran.



Sl.4.25 Ilustracija rada reflektora (opak-iluminatora) kod rudnog mikroskopa; a-polupropusno ogledalo, staklena pločica; b-refleksiona prizma sa ogledalima.

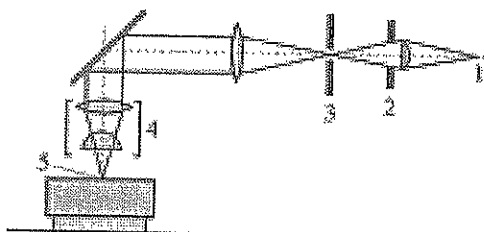
Alternativa polupropusne staklene ploče je kristalna prizma ili sistem (sa ogledalima), koja potpuno skreće svu upadnu svetlost, tako da se svetlost lomi na dole ali kroz polovinu polja aperture objektiva, pada na površinu preparata da bi se zatim reflektovala nagore i prolazi kroz onu drugu polovinu aperture objektiva, prolazeći iza prizme na svojoj putanji ka okularu (Sl. 4.25 b). U ovoj situaciji svetlosni snop može biti i kos u odnosu na površinu specimena što može da prouzrokuje pojavu ogledalne aberacije.

Kod konoskopskog osmatranja samo je polovina polarizacione slike vidljiva jer je druga polovina putanje zaklonjena refleksionom prizmom.

Prednosti refleksione prizme ili sistem ogledala je u tome da ona reflektuju veću količinu ulazne svetlosti (do 50 %) koja dolazi do okulara. Savremeni jaki izvori svetlosti, danas upotrebi prizme ne pridaju poseban značaj, čak većina istraživača, za rutinske poslove smatra upotrebu staklene pločice kao reflektora adekvatnom ili čak superiornom. K tome, neki stariji modeli mikroskopa sa prizmom sistema ogledala sa potpunom refleksijom uvode izvesnu eliptičnu polarizaciju, ali ovaj problem je prevaziđen razvojem prizme sa višestrukom refleksijom i uvođenjem polaroid pločice na donjoj strani prizme.

4.4.7 ILUMINACIONI SISTEM

Kao izvor, svetlosti u rudnoj mikroskopiji se uglavnom koriste dva tipa sijalica: sijalice sa užarenim metalnim vlaknom i drugi tip gasno zračenje. Za uobičajeni rutinski rad, sasvim zadovoljava i najčešće su u upotrebi sijalice sa užarenom volframskom niti. Sijalice su napona od 6 do 12 V a snage 15 do 100 W i nekim minimumom trajanja od 100 do 300 časova a napajaju se preko promenljivog reostata.



Sl.4.26 Šematski prikaz funkcionisanja iluminacionog sistema kod rudnog polarizacionog mikroskopa; 1—izvor svetlosti; 2—aperturna dijafragma; 3—dijafragma vidnog polja; 4—objektiv; 5—projekcija dijafragme u vidnom polju.

Rad pri vrlo niskim naponima, sa starom pocrnелom sijalicom, ili ako mikroskop nije adekvatno centriran, projektovanje niti užarenog vlakna u crvenom delu spektra onemogućava pravilan pa i bilo kakav rad mikroskopa. Neželjeni efekat može da se otkloni servisira-

njem mikroskopa ili postavljanjem matirane staklene ploče kao filtera. Izvor svetlosti treba, na dalje, tako da je postavljen da ne daje zračenje svetlosti sa vidnog polja koje je nekomforno i neprijatno za rad posmatrača. Temperatura užarene volframove niti u staklenom balonu sijalice varira od 2850° K pri 6 V i snazi sijalice od 15 W pa sve do 3300° K kod halogenih sijalica od 12V i 100 W napona. Ove temperature su daleko od temperature boje koju daju ksenonske halogene sijalice sa 6100° K i kada se koriste bez filtera, a omogućuju rad mikroskopa bez tendencije ka žutim i crvenim bojama. Stoga, većina korisnika postavlja svetloplavi filter između izvora svetlosti i ostatka iluminacionog sistema da bi obezbedili što više "dnevne svetlosti", bele svetlosti visokih temperatura zračenja.

Neznatne razlike u boji istog minerala, kada se posmatra na nekoliko mikroskopa, je upravo uzrokovana različitom temperaturom efektivnog zračenja izvora svetlosti tih mikroskopa. Poznavanje temperature boje zračenja nije neophodan podatak kod rutinskog rada sa mikroskopom, međutim, pri snimanju mikrofotografija ovaj podatak je neophodan radi izbora odgovarajućeg filma. Takođe je vrlo važan podatak i pri snimanju stepena refleksije ispitivanih minerala. Standardni iluminacioni sistem (Sl.4.26) sadrži dva sočiva, dve ili tri dijafragme, zatim polarizator kao sastavni deo izvora svetla. Aperturna dijafragma iluminatora služi da ograniči i oiviči vidno polje i reducira skrenute-rasute i odbijene zrake svetlosti. Dijafragma veličine polja, kod iluminatora, kontroliše upadni ugao konusnog snopa svetlosti koji pada na površinu preparata i treba da omogućujući svojim podešavanjem potpuno ili delimično smanjenje i okruženje vidnog polja. Sve to daje svetlosni snop sa skoro paralelnim zracima, minimizira pojavu eliptične polarizacije odnosno pojačava efekat kontrasta. Na mnogim mikroskopima treća dijafragma pomaže pri izostravanju slike. Merenje refleksije, mada se radi i sa standardnim niskovoltaznim sijalicama sa užarenim vlaknom, uglavnom zahteva bilo visoko intenzivna halogena svetla bilo ksenonski izvor svetla, sto omogućuje veliku količinu jakog svetla preko monohromatora u rasponu od 400 do 700 nm.

4.5 KVALITATIVNE OPTIČKE OSOBINE RUDNIH MINERALA

4.5.1 BOJA MINERALA

Vrlo mali broj rudnih minerala je intenzivno ili bar karakteristično obojen (kovelin, bornit, zlato) dotle je većina slabo obojena i čini se, posebno početnicima, kao bela sa velikim brojem nijansi sivog tona različitog intenziteta. Međutim, vremenom i iskustvom mnoge od vrlo suptilnih razlika u bojama postaju jasne i prepoznatljive. Premda su oči, opšte uzevši, sposobne da prepoznaju i vrlo male razlike u boji različitih faza u asocijaciji minerala, one imaju slabu "memoriju" boja. Drugi problem je da vidljive boje minerala u mnogome zavise od minerala koji ga okružuju (na primer, mineral halkopirit prepoznavamo po definisanoj i prepoznatljivoj žutoj boji kada je poredimo sa nekom belom ili sivom fazom, međutim ta boja bude zeleno-žuta kada se posmatra uz elementarno zlato). Ovaj fenomen "međusobne interfe-

rencije boja" znači da je neophodno dati mineral posmatrati u nizu asocijacija. Prema tome, boje minerala je najbolje opisivati kroz međusobna poređenja sa poznatim mineralima sa kojima su oni često u asocijaciji. Takođe je vrlo preporučljivo za individualna osmatranja dati svoj sopstveni opis određene boje, zbog same razlike u percepciji boja očima istraživača.

Takođe je vrlo teško osloniti se na tuđe opise i opazanja boja, stoga i u tabelarnim prikazima date opise treba shvatiti kao generalno uputstvo ili približan opis individualnih minerala. Drugi razlog za obazrivost pri prihvatanju kvalitativnog opisa pojedinih boja je činjenica da same boje zavise od toga koji se izvor svetlosti koristi i kog intenziteta, sto će izazvati i znatne razlike kada se koriste različiti mikroskopi. Tako se preporučuje na samom početku rada sa novim mikroskopom "privikavanje očiju" na primeru nekih običnih i lako prepo-

znatljivih a dobro poznatih minerala, odnosno onih koje već makroskopskim osmatranjem prepoznamo u preparatu i pre postavljanja pod mikroskop.

Boja minerala, kada se posmatra u planarno polarisanoj svetlosti ili ukrštenim nikolima (polarizatorima) je jedna od najvažnijih osobina a nažalost ona je jedna od najteže primenljivih osobina kad se počinje sa rudnom mikroskopijom. Da bi se prevazišle te prve teškoće neophodno je da su zadovoljeni i sledeći uslovi:

- ♦ mikroskop je pravilno podešen
- ♦ preparat je sveže ispoliran ili ako nije da je bio čuvan na suvom i tamnom mestu. Ukoliko ovo nije slučaj, mogu se javiti poteškoće jer izvesni minerali kao što je Cu-elementarni, srebro vrlo brzo zatamne (oksidisu) kada se ostave slobodni na vazduhu te ih je neophodno prepolarizirati da bi se mogla videti "prava" boja minerala.
- ♦ da preparat bude obavezno osmatran pod odgovarajućim i konstantnim osvetljenjem.

Mikroskop treba tako podesiti za rad (ukoliko je tehnički moguće) da se osmatranje vrši u što je moguće jačem osvetljenju, a istovremeno komfornom za oči osmatrača.

Uslov je takođe i sposobnost razlikovanja boja. Mnogi ljudi nemaju sposobnost razlikovanja izvesnih boja (daltonizam) ili ih neodgovarajuće primaju. U tom smislu, dešava se da se za isti mineral, pod istim uslovima, opis boje razlikuje i varira od osobe do osobe.

Većina minerala ima boje koje variraju od čisto bele do tamno sive a samo je mali broj minerala stvarno i izuzetno obojen. Neopodno je prepoznavati vrlo suptilne razlike u boji pastelnih primesa boja kao i različite stepene sivog ili belog tona kao nijansi u intenzitetu ili jednostavno bez njih.

Sledeći saveti mogu biti od koristi:

① Treba pogledati što je moguće više uzoraka, preparata istog minerala i tada videti moguće varijacije koje može jedan te isti mineral da pokaže;

② Uvek napraviti zabeležku, opis boje pri osmatranju i ne oslanjati se potpuno na podatke iz tabela specijalizovanih knjiga, već ih prihvatiti samo kao uputstvo ili pomoć. U izvesnim slučajevima specimen koji se ispituje može da ne pokaže ni jednu od opisanih boja datih u tabelarnim pregledima;

③ Pri posmatranju nekog minerala, zgodno je, odabrati površinu koja će prekrivati celo vidno polje (čiju veličinu možemo da regulišemo) i pri tome menjati osvetljenost. Promene u intenzitetu i zasićenju boja, kod odabranog minerala, treba da su jasno uočljive, na primer od svetlo do zagasito žute ili čak od svetlo žute do bele. Nakon toga vratiti jačinu osvetljenosti na početne optimalne uslove. Ovaj primer ilustruje poteškoće koje se mogu pojaviti ukoliko nije obezbeđen konstantni intenzitet osvetljenosti onda kad se osmatraju različiti uzorci istog minerala;

④ Zahvaljujući tome da varijacija boje zavisi i od minerala koji ga okružuju, tako sulfid može biti u petrogenoj osnovi jedne boje ili druge kad je u neposrednoj blizini minerala koji je jasno obojen ili zamagljen u boji. Ovaj efekat je poznat kao "neutralna interferencija boja". Ove razlike mogu varirati u zavisnosti od toga da li se posmatra mineral u vazduhu ili imerziji ulju.

Tablice u prilogima knjiga su tako napravljene da mogu dosta da pomognu korisniku po ovom pitanju. Tako imamo na primer halkopirit i opis "halkopirit pored galenita će biti intenzivnije žut" nego sam mineral, istovremeno halkopirit "pored zlata pokazuje zeleno-žutu boju ili je mutniji". Slično tome je i primer kada mineral ispuni celo vidno polje, dešava se da on daje sasvim drugačiji utisak o boji od onoga koji ima ako se posmatra samo mala površina u asocijaciji s drugim sulfidnim mineralima ili drugim petrogenim mineralima. Preporučljivo je stoga početi sa radom objektivima pri malim uvećanjima i što je moguće veću površinu preparata pregledati, pri različitim otvorima dijafragme.

4.5.2 BIREFLEKSIJA I REFLEKSIONI PLEOHROIZAM

Kada se mineral posmatra u planarno polarisanoj svetlosti i okreće stočić mikroskopa, moguće je zapaziti promenu intenziteta refleksije (sjaja) i/ili promenu u zasićenosti bojom.

• Promena u intenzitetu refleksije sa polirane površine preseka minerala nazivamo birefleksijom ili dvojn timer odbijanjem svetlosti.

• Promena u intenzitetu obojenja (zasićenosti bojom) nazivamo refleksioni pleohroizam.

Treba odmah naglasiti da minerali koji teseralno kristališu, u normalnim okolnostima ne pokazuju gore pomenute efekte, bez obzira na orijentaciju preseka zrna ili kristala koji se posmatra.

Većina minerala iz drugih kristalizacionih grupa pokazuje u manjem ili većem stepenu promene u refleksiji i boji kada se određeni procesi rotiraju na stočiću. Preseci po bazi, kod heksagonalnih ili tetragonalnih minerala takođe ne pokazuje birefleksiju ni refleksioni pleohroizam.

Efekat birefleksije je uzrokovan sledećim činjenicama:

♦ Indeksom prelamanja (RI) medijuma koji se nalazi između sočiva objektiva i specimena, kod većeg RI biće zabeležena i veća birefleksija;

♦ Orijentacija minerala. Naime, minerali mogu pokazati različit intenzitet birefleksije, od 0 do nekog maksimuma, a sve zavisno od njihove orijentacije. Neki autori pokušavaju da kvantifikuju ovaj efekat koristeći se terminima, u gradaciji, kao: vrlo slaba, slaba, umerena, jaka, i vrlo jaka birefleksija. Efekat može da se zapazi čak i na prozirnim mineralima (to su često minerali jalovine) koji poseduju jaku birefleksiju kao što su karbonati Ca, Mg, Fe i Pb. Ali ovo nije vidljivo ukoliko se radi o masivnoj teksturi (odnosno kada su monomineralni preparati).

Saveti pri identifikaciji:

- ① Treba podesiti konforno jačinu osvetljenosti;
- ② Preporučuje se korišćenje objektiva sa što je moguće manjim povećanjem;
- ③ Sve dijafragme treba što je moguće više otvoriti;
- ④ Centrirati izvor svetlosti;
- ⑤ Ukoliko je poznato da mineral ima slabu ili umerenu birefleksiju treba odabrati jedno područje gde se nalaze dva ili tri zrna u neposrednom kontaktu. U takvoj situaciji, lakše je za oko da detektuje te neznatne razlike u promenama za osmatrana zrna.

Tablica 4.15 Refleksioni pleohroizam – birefleksija nekih najvažnijih rudnih minerala.

Visok i jako izražen	Visok i jasno vidljiv	Slab ali jasno vidljiv	Vrlo slab, vidljiv na rubovima zrna	Ne pokazuju pleohroizam
Valerit Grafit Kovelin Molibdenit	Delafosit Nikelin Antimonit Auripigment Kermesit Getit	Enargit Kalcit Kubanit Luzonit Malahit Markasit Pirotin Rutil Siderit Smitsonit Ceruzit Cinabarit	Arsenopirit Bornit Volframit Kasiterit Kuprit Realgar Hematit	Anglezit Argentit Halkozin Halkopirit Teseralni min.

Ukoliko ispitivano područje zauzima celokupno vidno polje odnosno posmatramo krupan kristal, tada blizne lamele mogu dati sličan efekat. Refleksioni pleohroizam koji pokazuje kovelin je najuočljiviji kada se promena boje kreće od plavosive do modroplave. Drugi minerali koji pokazuju karakteristične efekte su: nikolit - ružičastomrka do plavobela, grafit - mrkosiva do sivo-crna, kubanit - ružičastomrka do žuta. Dok je kod sledećih minerala premda oni pokazuju ove efekte, teže (u početku) zapaziti birefleksiju: bizmutinit - beosiv do žuto-beo; pirotin - ružičastomrka do tamnomrkožuta; mile-rit - nijanse žute.

Razlika u količini reflektovane svetlosti, od minimalne do maksimalne vrednosti, je mera efekta birefleksije. Primer ekstremnih vrednosti birefleksije beleži se kod grafita, molibdenita, kovelina, stibnita i drugih. Važno je podsetiti da su obe (birefleksija i refleksioni pleohroizam) ove osobine u funkciji orijentacije preseka kristala u odnosu na upadni ugao svetlosnog snopa i pri različitoj orijentaciji pokazuju stanje od bezefektnih do maksimalnih vrednosti. Kod ispitivanja vrlo slabe ili umerene birefleksije ili refleksionog pleohroizma preporučuje se osmatranje bar dva zrna u neposrednom kontaktu, kako bi oči mogle da zapaze i najmanje razlike.

4.5.3 ISPITIVANJE U KOSO PADAJUĆOJ SVETLOSTI

Pod pojmom "koso padajuća svetlost" se podrazumeva ispitivanje u svetlosnom snopu koji se reflektuje sa površine poliranog preparata, ali tako da ne prolazi kroz opak-iluminator (reflektor). Pri ovakvom osvetljenju ispitivani mineral se posmatra i izučava u difuzno odbijenoj svetlosti, pod uslovom da je u jednom okruženju različitih vrsta minerala. Ukoliko je osmatrana polirana površina "bezstrukturna" tj. ako predstavlja idealnu ogledalnu površinu a uz to i bez prisustva drugih mineralnih faza, a osvetljava se koso padajućim snopom svetlosti bez obzira na jačinu osvetljenosti, vidno polje će ostati savršeno jednolično zatamnjeno. Naravno podrazumeva se, da u praksi nepostoje takve idealne i apsolutne jednorođne polirane površine, pa se i pri koso padajućem svetlosnom snopu javljaju izvesni efekti, koji služe kao dijagnostičke karakteristike pri determinaciji minerala u sirovini kako rudnih tako i minerala jalovine.

Efekti koji se manifestuju pri osvetljavanju površine sa koso padajućim snopom svetlosti, su različite refleksije sa različitih minerala. Na primer kod minerala sa

srednjom refleksijom svetlosti, jasno se uočavaju unutrašnji strukturni elementi (granice pojedinih zrna, granice lamela bližnjenja, srastanje i dr.) a vide se kao tanke svetle linije. Mesta defekata, pukotine cepljivosti kao i strukture nagrivanja, ogrebotine poliranja, otisci prstiju, prašina i druge nečistoće, zamašćivanje, skrame, oksidacija, vide se kao svetle tačkice ili zatamnjenja na osnovnoj površini.

Kod minerala sa vrlo niskom refleksionom sposobnošću (providni do prozračni) zapažaju se osim strukturnih elemenata (granice pojedinih zrna, granice sraslaca kao i lamela) i izvesne inkluzije, a kod obojenih minerala vidi se i njihova sopstvena boja. Osvetljavanje u koso padajućem svetlosnom snopu ima i izvesnih prednosti u odnosu na perpedikulano padajuće osvetljenje. Činjenica je da pri osvetljavanju vidnog polja bez opak-iluminatora a uz pomoć tako odbijene svetlosti i sočiva objekta, formira se tzv. svetlosni talas koji čini da slika u oku bude nejasna i mutna. Pri osvetljavanju pod uglom ovaj nedostatak se eliminiše jer svetlost na putu do objekta ne prolazi sočiva objekta. Preimućstva koso padajuće svetlosti su posebno interesantni kod minerala sa niskom refleksionom sposobnošću. Osvetljavanje površine specimena uz pomoć koso padajućeg svetlosnog snopa je moguće sa jedne ili svih strana.

Koso padajući svetlosni snop sa jedne strane se postiže na sledeći način: isključuje se izvor svetlosti koji usmerava svetlost vertikalno na preparat i sa istim izvorom svetlosti, a može i bilo koji drugi, se osvetli osmatrana površina sa jedne strane. Koso padajuća svetlost nije postojana pa se reguliše za svaki pojedinačni slučaj posebno. Izvor svetlosti se pri ispitivanju postavlja na poziciju pri kojoj su efekti najbolje izraženi. Ovaj vid ispitivanja se obavlja sa objektivima manjeg uvećanja.

Koso padajući svetlosni snop koji pada na površinu preparata sa svih strana se postiže posebnim uređajima koji daju isti efekat. Jedan takav uređaj nosi naziv "ultropak" a nalazimo ga kod Lajtsovih rudnih mikroskopa. Konstrukcija tog "ultropak"-a pogodna je za sva ispitivanja u koso padajućem osvetljenju. To je u stvari objektiv sa dvostrukim tubusom, u čijem se unutrašnjem delu nalazi prstenasti kondenzor svetlosti. Na vrhu tog prstenastog kondenzora je postavljeno pod uglom od 45° jedno prstenasto ogledalo koje ferlektuje svetlosne zrake na dole i koncentriše ih kroz sistem sočiva na površinu preparata, idući od izvora svetlosti. (Reflektovani zraci prolaze kroz prstenasti kondenzator i padaju na vrh objekta). Utvrđeno je da ispitivanje u imerziji (de-

stilovanoj vodi) sa uređajem "ultropak", slika dobija veliku jasnoću. To se postiže prekrivanjem rudnog preparata destilovanom vodom i pokrovnim staklom.

4.5.4 OSMATRANJE MINERALA PRI UKRŠTENIM POLARIZATORIMA

Kada se teseralni mineral posmatra pri ukrštenim polarizatorima, bez obzira kakva orijentacija uzorka bila, on će ostati taman ili crn pri punoj rotaciji stočića od 360°. Nije neophodno da on bude potpuno crn ali on neće pokazivati nikakvu promenu po intenzitetu ili boji osvetljenosti. Preseci heksagonalnih ili tetragonalnih minerala po bazi, takođe će pokazati identične efekte a takve minerale ili preseke nazivamo izotropnim. (Tablica 4.16)

Tablica 4.16 Primeri boja izotropnih i slabo anizotropnih minerala

Boja	Mineral
Crvena	Elementarni bakar
Žuta	Elementarno zlato
Krem	Pentlandit
Bela	Galenit
Žuto bela	Pirit
Sivo bela	Tetradrit, tenantit
Siva	Hromit, Uraninit
Svetlo siva	Sfalerit
Mrko siva	Magnetit

Polirani preseci minerala, koji pokazuju promene u intenzitetu boje, kao i promene osvetljenosti tokom rotacije stočića za pun krug, kažemo da su anizotropni (Tablica 4.17). Ukoliko je uzorak anizotropan, on treba da pokaže četiri pozicije (90°, 180°, 270° i 360°) pri kojima je najtamniji ili kako se kaže u mineralogiji "da se gasi", i četiri pozicije maksimalne osvetljenosti (45°, 135°, 225° i 315°). Anizotropija može da varira po intenzitetu i najčešće se izražava relativnim pojmovima: vrlo slaba, slaba, umerena, jaka i vrlo jaka. Treba imati u vidu da ne samo opaki minerali pokazuju anizotropiju već i karbonati (kalcit, dolomit, siderit, ceruzit itd.) pa čak i sfen pokazuje anizotropiju u odbijenom svetlu.

Tablica 4.17 Primeri boja nekih karakterističnih anizotropnih minerala

Mineral	Stepen anizotropije	Boje anizotropije
Kovelin	vrlo visok	nijanse oranž, oranž-crvena, purpurna
Molibdenit	vrlo visok	undulatorno gašenje, mrkosiva, ljubičastokrem
Ilmenit	jasan	plavosiva do mrkosiva
Nikelin	jak	nijanse sive i zelenožute

Od praktičnih saveta pri identifikaciji minerala ukazuje se na sledeće:

① Ispitivati što je moguće više zrna istog minerala. Na taj način neko zrno, bilo gde u specimenu, mora pokazati maksimalan stepen anizotropnosti.

② Za fino usitnjenu rudu, ili proizvode koncentracije, neophodni su objektivni velikog povećanja kao i jača osvetljenost nego u normalnim uslovima. Aperturna di-

jafragma treba da je skoro zatvorena a dijafragma veličine polja tako podešena da prekriva sve osim površine koja se trenutno ispituje.

③ Rotirati analizator a ne stočić (tamo gde je to tehnički izvodljivo) napred-nazad za nekih 10-30 stepeni oko tačke totalnog zatamnjenja (gašenja).

④ Upoređivati stalno efekte osmatranja sa tabelarnim podacima iz priručnika.

Pored svega toga preduzetog javiće se poteškoće u vidu anomalnih efekata:

• Neki od teseralnim minerala nisu potpuno izotropni. Naime, mogu da se pojave slabo anizotropni efekti mada to neće onemogućiti njihovu identifikaciju prema drugim osobinama. Pirit i bornit su posebno skloni ovim anomalnim efektima.

• U slučaju da je mekani mineral loše ispoliran, splet finih ogrebotina (često se pojavljuju čak i paralelni tragovi) ostavljaju utisak anizotropije. Pažljivim fokusiranjem, pri velikim povećanjima, moguće je jasno razlikovati anomalne efekte nastale ogrebotinama i prave anizotropije.

• Dešava se da anomalni anizotropizam bude izgubljen tokom poliranja preparata. Ukoliko je preparat bio pripreman odgovarajuće pažljivo tj. znajući da tretirani mineral zaslužuje posebne mere opreza i tretman, primetiće se anomalni anizotropizam kod pirita kao i kod nekih drugih teseralnih sulfida i arsenida.

4.5.5 UNUTRAŠNJI REFLEKSI

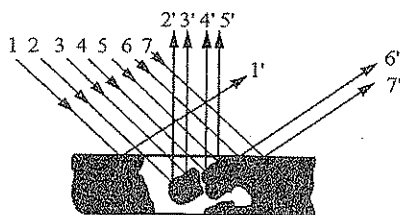
Unutrašnji refleksi su bezbojni ili različito obojeni svetlosni zraci reflektovani iz unutrašnjosti minerala sa ravni pukotina, defekata kristala, različitih inkluzija, pljosni bliženja, pljosni drugih neprozračnih minerala i dr. Ovako odbijeni i prelomljeni svetlosni zraci će se pojaviti, kao difuzne oblasti ili "krpe", na poliranoj površini kristala, a efekat smo nazvali unutrašnji refleksi. Unutrašnji refleksi i njihova boja predstavljaju važne dijagnostičke parametre.

Boja, unutrašnjih refleksa nekog minerala, odgovarajuće talasne dužine, predstavlja u stvari onaj deo spektra polihromatskog upadnog belog svetla koji je propušten kroz kristal i reflektuje karakterističnu komplementarnu "boju mase" kroz koju je prošao, dok su svi drugi delovi spektra apsorbovani.

Na slici 4.27 šematski je prikazano nastajanje unutrašnjih refleksa. Svetlosni zraci 1, 6 i 7 se reflektuju sa polirane površine preparata i ne dolaze do oka posmatrača. Delovi vidnog polja datog minerala sa kojih se ti zraci reflektuju biće tamni. Zraci 2-5 delom prodiru u unutrašnjost minerala i nailaskom na nepropusne površine ili uklopke se reflektuju nazad ka površini. Reflektujući se kroz (proziran) mineral i padajući u oko posmatrača odražavaju stepen prozračnosti i boju tog minerala. Sama refleksija zraka prodrlih do različitih dubina, u odnosu na poliranu površinu, zavisice od apsorbcije svetlosti datog minerala, što je ona veća i dubina prodiranja će biti manja. Kod prozračnih minerala svetlosni zraci se većinom reflektuju (izviru, izbijaju) sa većih dubina (prodiru dublje u unutrašnjost minerala); kod minerala sa slabijom apsorbcijom svetlosti, reflektuje se i sa manje dubine, dok je kod minerala sa jakim apsorbcijom, u koje svetlost gotovo i ne prodire, refleksija sasvim odsustvuje.

Tablica 4.18 Tipične boje unutrašnjih refleksa koje pokazuju neki rudni minerali.

Preovlađujuća boja unutrašnjih refleksa	Tipičan mineral	Uslovi posmatranja
Žuta	Sfalerit, kasiterit, getit, rutil	U vazduhu a pojačavaju se u ulju
Crvena	Kuprit, prustit, getit, pirargirit, marmatit, tenantit, manganit, rutil, hematit, cinabarit	Uglavnom vidljivi u ulju (posebno prah minerala)
Mrka	Sfalerit, kasiterit, hromit, volframit, rutil, uraninit	Vidljivi u ulju
Bezbojna	Šelit, sfalerit, rutil, kasiterit i većina petrogenih minerala	Vidljivi u vazduhu, pojačavaju se u ulju



Sl.4.27 Prikaz nastajanja unutrašnjih refleksa.

Boja unutrašnjih refleksa je u stvari boja minerala u propuštenoj svetlosti. Tako imamo: kod zelenog malahita unutrašnje zelene reflekske (boja minerala u odbijenoj svetlosti je tamnosiva); kod crvenog kuprita unutrašnji refleksu su svetlo crveni, plavi (boja minerala u odbijenoj svetlosti plavo-bela). Kod prozirnih bezbojnih minerala boje unutrašnjih refleksa su složenije i zavise od disperzije prelomljenih zraka unutar minerala. Većina rudnih minerala ima unutrašnje reflekske crvene, žute i mrke boje sa različitim promenama.

Boje unutrašnjih refleksa se stapaju (mešaju) sa bojom koja se reflektuje sa površine preparata a njihova jasnoća zavisi od uslova ispitivanja.

Unutrašnji refleksu su jasni pri ukrštenim Nikolima. Tako kod izotropnih kristala kao i kod anizotropnih preseka minerala u položaju analizatora sa pogašenjem (zatamnjenjem) svi zraci koji su reflektovani sa površine biće "ugašeni" analizatorom dok će istovremeno zraci unutrašnjih refleksa (sada depolarizovani zraci) biti jasno vidljivi.

U slučajevima kada pak mineral ima jake unutrašnje reflekske, a istovremeno slabu anizotropiju, boja unutrašnjih refleksa će da dominira i kažemo da unutrašnji refleksu maskiraju boje anizotropije. Posmatranjem u vazduhu bez ukrštenog analizatora unutrašnji refleksu su po pravilu vidljivi kod prozirnih minerala čak i sa relativno niskom refleksijom ($R=5-10\%$). Korišćenjem ulja kao imerzije daleko je lakše otkriti unutrašnje reflekske i kod minerala koji ih u "vazduhu" ne pokazuju. Kod minerala kod kojih ih je teško zapaziti preporučuje se njihovo otkrivanje u prahu tog minerala, koji se stvara kada se površina minerala zapara iglom.

Unutrašnji refleksu su slučajne i neravnomerne pojave za razliku od efekata jake anizotropije kod minerala (molibdenit, grafit, kovelin), čija pojava ima karakter zonomernosti. Dešava se da unutrašnji refleksu mogu maskirati čak i jaku anizotropiju. U takvim slučajevima se preporučuje ispitivanje praha datog minerala u imerziji ulju pri ukrštenim Nikolima.

Kod ispitivanja minerala, unutrašnje reflekske kao dijagnostičko obeležje je moguće podeliti u grupe po intenzitetu pojave i po karakteru obojenosti.

Po intenzitetu pojavljivanja unutrašnjih refleksa (nezavisno od boje) minerali se dele na tri grupe (po R. N. Sobolev, 1990.):

1. **jaki** - kod poluprozirnih minerala sa refleksijom od 18-30 % i kod prozirnih minerala sa refleksijom manjom od 18 % (cinabarit, kuprit, auripigment, realgar, sfalerit i dr.) koji se zapažaju pri manjim uvećanjima paralelnim Nikolima ili ukrštenim Nikolima u vazduhu;

2. **slabi** - kod poluprozirnih minerala sa refleksijom od 10-44 % (volframit, hematit, hromit i dr.) vidljivih u prahu ispitivanih minerala ili u imerziji pri ukrštenim Nikolima;

3. **nevidljivi** - kod minerala sa visokom apsorpcijom odnosno kod neprozirnih rudnih minerala sa refleksijom većom od 44 %.

Po boji unutrašnjih refleksa (nezavisno od stepena pojavljivanja) mogu se izdvojiti takođe tri grupe:

1. bezbojni, žuti, mrki;
2. crveni (karmen crveni, mrko-crveni, purpurno crveni, rubin crveni);
3. zeleni i plavi.

Kod posmatranja unutrašnjih refleksa savetuje se:

① Objektivni manjeg povećanja su pogodniji ukoliko se ne radi o uzorku koji je vrlo fino usitnjen.

② Ukoliko je moguće, osvetljavanje treba postaviti na maksimum, ali ne i dugo vremena, jer može biti štetno za oči a takođe i da skрати vek trajanja sijalice.

③ Kod uzoraka sa složenim strukturnim odnosima minerala ili one sa vrlo sitnim agregatima, briketiranim u pleksiglasu, odnosno kada je preporučljivije korišćenje objektivna sa velikim povećanjem, UR se najbolje vide u imerziji (ulju), a kada je neophodno da se koriste specijalna sočiva za ovu tehniku osmatranja.

④ UR se mogu ponajpre i najbolje videti po rubovima zrna minerala.

4.5.6 TVRDINA MINERALA

Tvrđina minerala predstavlja značajan kvalitativni parametar i jedna od glavnih konstanti rudnog minerala pri identifikaciji minerala kod primenjene rudne mikroskopije. Tvrđina predstavlja osobinu materije - minerala da se suprotstavlja svakom spoljašnjem mehaničkom delovanju. Tvrđinom rudnog minerala naziva se sposobnost njegove polirane površine da pruža otpor na paranje (grebanje), brušenje i poliranje, kao i pri pružanju otpora pri utiskivanju pod dejstvom pritiska. Minerale karakteriše različita tvrđina u zavisnosti od kristalografskih pravaca Fizička suština tvrđine je kompleksna. Ona

obuhvata otpornost na plastične, elastične deformacije kao i na razrušavanje odnosno mehaničko deformisanje, te se u potpunosti može okarakterisati kao način suprotstavljanju delovanja (mehaničkog) na materiju.

Tvrđinu je moguće odrediti na više načina: moguće ju je odrediti paranjem, grebanjem-tvrđina na ogreb; rezistentnošću ili otpornošću na glačanje - tvrđina na poliranje ili metod relativnog reljefa; protivljenjem na pritisak odnosno utiskivanje - Vickers-ova mikrotvrđina (VHN).

4.5.7 ODREĐIVANJE TVRDINE MINERALA METODOM PARANJA

Za određivanje mikrotvrđine rudnih minerala, u rudnoj mikroskopiji se široko primenjuje metod paranja - grebanja čeličnom i bakarnom iglom. Tvrđina čelične (šivaće) igle iznosi 5, a bakarne 3, po Mos-ovoj skali. Paranje površine minerala vrši se na krupnim mineralnim zrnima, direktno u vidnom polju mikroskopa, pri uvećanjima objektivna 4,7x i 9x. Ako mineral ima manju tvrđinu od igle, tada se na poliranoj površini obrazuje ogrebotina. Većina rudnih minerala je krta i pri grebanju iglom stvara se prašak. Kod nekih minerala nakon paranja duž brazde javlja se strugotina. Ako je mineral pak kovani igla ostavlja trag u vidu žljeba i kovrdžast materijal iz njega. Pri klasifikaciji minerala prema tvrđini na paranje razlikuju se tri grupe:

- ♦ minerali niske tvrđine (do 3 po Mos-u) paraju se bakarnom iglom;
- ♦ minerali srednje tvrđine (od 3 do 5 po Mos-u) paraju se čeličnom iglom, ali ne i bakarnom;
- ♦ minerali visoke tvrđine (više od 5 po Mos-u) teško se paraju čeličnom iglom, ili ogreb sasvim izostaje.

Na specijalnom priboru - mikrosklerometru *S.B. Talmlejdža*, određivanje tvrđine paranjem minerala vrši se dijamantskim vrhom pod određenim opterećenjem, tako da se svaki put na poliranoj površini minerala dobija ogrebotina standarde širine. Prema ovim podacima Talmlejdž je sve minerale podelio u sedam grupa, označivši svaku grupu odgovarajućim slovom (A-za najnižu tvrđinu, B, C, D, E, F i G- za najvišu tvrđinu).

4.5.8 ODREĐIVANJE TVRDINE MINERALA PO RELATIVNOM RELJEFU

Pri izradi rudnih preparata minerali pokazuju različit otpor na brušenje i poliranje, što je pre svega uslovljeno tvrđinom minerala, mada na kvalitet poliranja utiču i druge osobine (krtost, kovnost, cepljivost). Pri gruboj obradi brušenjem i finoju obradi poliranjem na određenim tkaninama, tvrdi minerali se obrađuju vrlo sporo za razliku od mekih minerala. Rezultat takvog ponašanja tokom poliranja je da su na preparatima tvrdi minerali nešto višji, izdignuti u odnosu na meke minerale koji ih okružuju. Pri ovome tvrdi minerali stvaraju pozitivan reljef, a meki minerali negativan reljef. Najbolje se poliraju rudni minerali srednje tvrđine (sfalerit, halkopirit, tetraedrit, bornit i dr.). Tvrdi minerali se teško poliraju te na njihovim površinama zaostaju neravnine, rupice koje rasejavaju vertikalni upadni svetlosni snop, tako da se stvara utisak crnih tačkica i tamnih rubova (hromit, kasiterit, arsenopirit, naročito pirit). Minerali niske tvrđine (zlato, molibdenit, grafit), takođe se teško

poliraju jer se prilikom poliranja "razmazuju" primenjenim abrazivom.

Tablica 4.19 Tvrđina na poliranje minerala* - šlifovska tvrđina (Schneiderhohn, 1952.)

Meki minerali (tvrđina manja od galenita)
Argentit, realgar, auripigment, antimonit, kovelin, arsen, cinabarit, bulanžerit.
Minerali srednje tvrđine (tvrđine između galenita i pirotina)
Galenit, halkozin, burnonit, ceruzit, anglezit, bornit, molibdenit, halkopirit, kalcit, fluorit, grafit, delafosit, barit, kuprit, zlato, bakar, kubanit, malahit, azurit, enargit, sfalerit, siderit, pentlandit.
Tvrdi minerali (tvrđina veća od pirotina)
Pirotin, magnetit, maghemit, arsenopirit, volframit, ilmenit, hromit, hematit, rutil, markasit, pirit, kvarc, kasiterit, korund, dijamant.

* Porast tvrđine minerala odgovara redosledu minerala u tablici.

4.5.9 TVRDINA NA OGREB

Metod utvrđivanja tvrđine na ogreb, predložen od Short-a (1940) je vrlo jednostavan ako se test pravilno izvodi a određuje se paranjem odnosno grebanjem. Oštrom čeličnom iglom se zagrebe površina rudnog preparata. Iglu ne treba pritiskati već je sasvim ovlaš držati, tako da sama svojom masom vrši pritisak na preparat i markira trag prevlačenja. Tvrđina čelične igle iznosi 5 po Mosu čiji je način utvrđivanja tvrđine dat u ranijem poglavlju. U početku će se razlikovati samo tvrdi i meki minerali, no vremenom i sa više iskustva moguće je odrediti čitav spektar različitih tvrđina.

S. B. Tamlage (1925.) predlaže, jednu od moguće najboljih šema za utvrđivanje tvrđine minerala na ogreb. On definiše sedam stepeni tvrđine s tim da svaki stepen karakteriše određeni specifični mineral (analogno Mohs-ovoj skali tvrđine).

- | | |
|---------------|-------------|
| A. Argentit | E. Nikolit |
| B. Galenit | F. Magnetit |
| C. Halkopirit | G. Ilmenit |
| D. Tetraedrit | |

Tamlage-ova podela na žalost nije prihvaćena kao standardna ali je poznavanje njegove skale tvrđine korisno kao relativan pokazatelj.

4.5.10 TVRDINA NA POLIRANJE

Kvalitativno tvrđinu minerala je moguće odrediti i na osnovu visine relativnog reljefa ili kako se još naziva i tvrđina minerala na poliranje. Otpor minerala na abrazivnost (habanje) je iskorišćena kao korisna osobina pri identifikaciji raznih mineralnih vrsta u poliranom specimenu. Naime, pri izradi rudnih preparata minerali se poliraju različito u datoj asocijaciji kako po brzini tako i kvalitetom. Meki minerali se poliraju brže i kvalitetnije a tvrdi pak sporije. Kao rezultat toga dobija se polirana površina preparata sa različitim visinom minerala ili različitim reljefom. Tvrdi minerali su mnogo otporniji, rezistentniji pri poliranju i deluju "ispupčeni" od mekih minerala a ova razlika u "ispupčenosti" ili "udubljenosti" predstavlja relativnu visinu reljefa minerala.

Tablica 4.20 Klasifikacije minerala po tvrđini (I.S. Volinski, 1990.).

Mineral	Grupa po Volinskom	Tvrđina po Mohs-u	Reljef	Mikrotvrđina po I.S. Lebedevov	Ponašanje pri poliranju
Argentit Ag_2S	I	2-2,5	<galenita	20-30	slabo
Galenit PbS	II	2,5	<argentita	64-110	dobro
Halkopirit CuFeS_2	III	3,5-4	>galenita <sfalerita	165-260	dobro
Sfalerit ZnS	IV	3,5	>halkopirita <pirotina	161-189	dobro
Pirotin FeS	V	4	>sfalerita <nikelina	207-343	dobro
Magnetit Fe_3O_4	VI	5,5	>sfalerita <arsenopirita	364-585	dobro
Pirit FeS_2	VII	6-6,5	>arsenopirita <kasiterita	965-1408	relativno dobro

Tablica 4.21 Grupisanje minerala prema relativnim reljefima

I Grupa	(H < od galenita)	Kerargirit, akantit, pecit, altait, tetradimit, sumpor, realgar, prustit, antimonit, pirargirit, samorodni bizmut
II Grupa	(galenit < H < bornit)	Galenit, bizmutin, kozalit, burmonit, zlato, arsen
III Grupa	(bornit < H < sfalerit)	Bornit, halkopirit, kubanit, molibdenit, grafit
IV Grupa	(sfalerit < H < platina)	Tetraedrit, tenantit, bakar, enargit, kuprit, stanin, sfalerit, vureit
V Grupa	(sfalerit < H < pirotin)	Pirotin, pentlandit, nikelin
VI Grupa	(sfalerit < H < arsenopirit)	Getit, magnetit, hromit, ilmenit, rutil, šelit, volframit, arsenopirit
VII Grupa	(arsenopirit < H < pirit)	Kobaltin, hematit, markasit, pirit, kasiterit

Visina "reljefa" minerala tako predstavlja vrlo važnu i lako uočljivu dijagnostičku karakteristiku. I.S. Volinski na osnovu tvrđine, odnosno reljefnosti, minerale deli u sedam grupa (Tablica 4.20). U tabeli je prikazana klasifikacija minerala u grupe, karakteristični predstavnici grupa i komparacija sa drugim metodama klasifikacije.

U tabeli 4.21 su prikazani sistematizovano minerali po grupama prema njihovim relativnim reljefima na poliranim površinama preparata.

Kod ispitivanja relativnog reljefa moguće je izvesti jednostavan test. Posmatrati granične dodirne linije dve mineralne vrste i izoštriti vidno polje. Pri podizanju tubusa okulara tanka kontaktna linija, zvana Kalb-ova svetlosna linija, davaće utisak kao da ulazi odnosno se kreće prema mekšem mineralu.

Tvrđina minerala na poliranje se može videti i na sledeći način: kada imamo uzorak vrlo pažljivo ispoliran najfinijom dijamantskom pastom, ali u kome su zaoštrale izvesne ogrebotine a koje se mogu lako uočiti, naročito ako preparat čine više mineralnih vrsta različitih tvrđina - takve ogrebotine poliranja su vidljive do same granice nekog zrna, da bi se zatim gubile kroz drugo susjedno zrno i ponovo se možda pojavljivale nastavlajući isti pravac na narednom zrnju, pod uslovom da je istog sastava ili tvrđine kao i ono prvo zrno. Iz tih odnosa je lako zaključiti o relativnoj tvrđini.

4.5.11 VIKERSOVA TVRDINA – VHN

Ova kvantitativna tehnika merenja protivljenja, rezistencije mehaničkog narušavanja strukture minerala, vrši se uz pomoć specijalnog pribora - mikrotvrđinometa. Obzirom na prvog proizvođača uređaja merene i izračunate vrednosti zovemo Vickers-ova mikrotvrđina (VHN).

Ovim uređajem se dejstvuje dijamantskom piramidom određenom stalnom silom na površinu minerala i određuje se dubina njenog utiskivanja. Suprotstavljanje minerala prodiranju i utiskivanju dijamantskog vrha određuje mikrotvrđinu. Za sam indentor (vrh obrnute piramide) najčešće se koristi tako izbrušen dijamant a po prvom proizvođaču firmi "Vikers", postupak određivanja mikrotvrđine nosi naziv Vickers-ova H_v mikrotvrđina. Kao važan dijagnostički parametar identifikacije minerala jeste različita veličina odnosno dubina otiska utisnutog određenom silom indentora u mineral. Teoretski forma kvalitetnog otiska Vickers-ove piramide treba da je kvadrat, čija se veličina dijagonale meri okular-mikrometrom. Mikrotvrđina, određena kao suprotstavljanje minerala utiskivanju vrha piramide, je određena odnosom opterećenja (u gramima) i površine otiska kontakta (u μm^2): $H = P/A$, gde je H -mikrotvrđina; P -opterećenje; A -površina otiska. Pri izračunavanju mikrotvrđine koristi se i sledeći obrazac: $H = (P^2 \sin^2 \theta) / d^2$, odnosno nakon zamene vrednosti ugla od 68° imamo vrednost Vickers-ove mikrotvrđine $H = (1,8544 P) / d^2$, u $\text{g}/\mu\text{m}^2$.

U cilju dobijanja optimalne dimenzije otiska (dužina dijagonale 20-25 μm) za svaku grupu minerala treba odabrati odgovarajuće opterećenje (masu u gramima). Standardna opterećenja za ogovarajuće grupe minerala i po pojedinim autorima prikazana je u tablici.

Tabela 4.22 prikazuje orijentaciona opterećenja za optimalne veličine otisaka u zavisnosti od reda tvrđine minerala (po I. S. Volinskom).

Na veličinu mikro tvrđine utiču mnogi faktori, zbog čega se preporučuje da se ispitivani mineral podvrgne seriji opita (merenja), a vreme utiskivanja svakog merenja da bude 15 sekundi. Takođe je preporučljivo da dijagonala otiska prizme ne bude duža od 1/3 srednjeg

Tablica 4.22 Orijentaciona opterećenja za optimalne veličine otisaka u zavisnosti od reda tvrđine minerala (I.S. Volinski, 1990.).

Grupe tvrđina		Raspon tvrđina po Vickersu pri opterećenju 100g	Standardna opterećenost, g		
Po S.I. Lebedevoj	Po Mohs-u		Po S.I. Lebedevoj	Po Jangu i Millmanu	Po G. Tubo
I vrlo meki	1-2	0-60	5-10	15	15-25
II meki	2-3	6-120	10-20	25	25-50
III srednje tvrdi	3-4	120-200	—	—	50-100
	4-5	200-550	20-50	50	
IV tvrdi	5-7	550-1100	50-100	—	100-200
V vrlo tvrdi	>7	1100-1400	200	100	300-500

prečnika zrna koje se ispituje, jer bi se u protivnom zrno izlomilo, a dobijena mikrotvrđina bi bila nerealna.

Kvantitativni metodi utvrđivanja mikrotvrđine omogućili su razvoj različitih instrumenata kao i tipova indentora. Danas najpoznatiji indentori (utiskivači) su *Vickers*-ov (obrnuta kvadratna piramida) i *Knoop*-ov indentor (obrnuta izdužena piramida). Tako priznate u svetu sistematizacije minerala uzimaju kod identifikacije podatke za mikrotvrđinu po *Vickers*-u (*Bowie* i *Taylor*, 1958; *Young* i *Millman*, 1964.) i može se reći da je to najšire prihvaćen metod u rudnoj mikroskopiji.

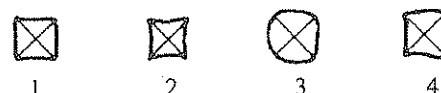
Kako je mikrotvrđina vektorska veličina pri usvajanju određene vrednosti neophodno je uzeti srednju vrednost merenja snimljenih na više zrna istog minerala. U narednoj tablici prikazana je *Vickers*-ova mikrotvrđina (VHN) za karakteristične minerale tako što je data srednja vrednost čitavog niza merenja sprovedenih od različitih istraživača i raspon vrednosti iz kojih je izračunata. Tablica 4.23, prikazuje vrednosti koje su prikupili *McLeod* i *Chamberlain* (1968.) i prikazali u svojim obimnim tabelarnim prikazima.

Oblik otiska mikroindentora. Savršeno kvadratni otisak, jasno otisnut, bez pratećih pojava sekundarnih struktura je vrlo redak slučaj kod testiranja minerala na mikrotvrđinu. Međutim, čak i nepravilan oblik otiska i raznovrsne prateće sekundarne pukotine, mogu biti vrlo indikativni i karakteristični pri pružanju niza dodatnih informacija o identitetu (a ponekad i orijentaciji) minerala.

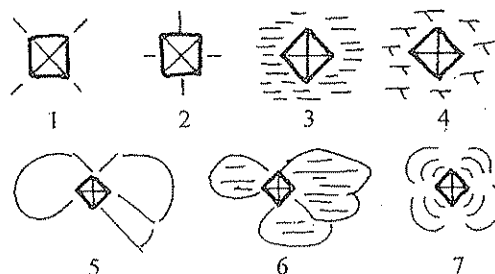
Young i *Millman* (1964.) su proučavali na velikom broju uzoraka oblike otisaka i karakteristike pukotina nastalih pri mikrotiskivanju indentora. Ovi autori su registrovali osnovne karakteristike oblika otisaka i izdvojili četiri prepoznatljiva tipa: 1. ravni rubovi, 2. konkavni rubovi, 3. konveksni rubovi, i 4. otisci sa sigmoidalnim rubovima, ivicama (Sl.4.28). Stepenn deformisanosti (zakrivljenosti) neravnih rubova otisaka se takođe može klasifikovati kao nizak odnosno visok.

Pucanje (mikropukotine) ili samo deformisanje su prateće pojave, kao što je već rečeno, pri utiskivanju dijamantske piramide, a što je posebno izraženo kod minerala sa karakterističnim klivažom odnosno lomljenjem. Isti autori, *Young* i *Millman* (1964.) su i tu izveli klasifikaciju prema zapaženim frakturama: 1. zvezdaste radijalne pukotine, 2. bočno radijalne pukotine, 3. pukotine cepljivosti, 4. pukotine bližnjenja, 5. školjkaste pukotine, 6. školjkaste pukotine sa frakturama cepljivosti, 7. koncentrično bubrežaste pukotine. Raznolikost oblika, tipovi deformacija i karakteristične pukotine utiskiva-

nja su ilustrovane na slici 4.29. Naravno, treba imati na umu da varijacije karakterističnih oblika i mikro pukotine mogu zavisiti od orijentacije kristala, posebno za minerale sa visoko izraženom anizotropijom struktura, kao što su naprimer kovelin ili molibdenit.



Sl.4.28 Oblici otisaka i karakteristike pukotina nastalih pri mikrotiskivanju indentora. Četiri prepoznatljiva tipa: 1-ravni rubovi, 2-konkavni rubovi, 3-konveksni rubovi, i 4-otisci sa sigmoidalnim rubovima, ivicama.



Sl.4.29 Ilustracija raznolikosti oblika, tipovi deformacija i karakteristične pukotine utiskivanja: 1-zvezdaste radijalne pukotine, 2-bočno radijalne pukotine, 3-pukotine cepljivosti, 4-pukotine bližnjenja, 5-školjkaste pukotine, 6-školjkaste pukotine sa frakturama cepljivosti, 7-koncentrično bubrežaste pukotine.

Postupak i instrumentalna tehnika. Danas je moguće nabaviti mnoštvo instrumenata za merenje *Vickers*-ove mikrotvrđine. Ovi uređaji se prodaju kao dodaci koji se montiraju na standardne rudne mikroskope ili su pak projektovani kao sastavni delovi istraživačkih mikroskopa. U svakom slučaju osnovu uvek čine mikroskopi za rad u odbijenoj svetlosti, sa fiksnim ili posebno odvojenim indentorom pričvršćenim za rotacioni nosač objekta. Ovakva konstrukcija mikrotvrđinomera omogućava vrlo brzu i laku zamenu sa objektivima koji su trenutno u upotrebi. Drugi važan deo je okular-mikrometar uz pomoć koga se vrši tačno merenje dimenzija otisaka. Pritisak, kojim treba izvršiti utiskivanje indentora na površinu preparata, izražen kao masa u gramima, može biti odabran direktno pre puštanja uređaja u pogon ili se može koristiti predhodno baždaren pneumatski uređaj.

Tablica 4.23 Primer vrednosti Vickers-ove mikrotvrđine nekih rudnih minerala.

Rudni mineral	Vickers-ova mikrotvrđina	
	Srednja	Raspon
Argentit	42	20-91
Arsenopirit	1010	890-1283
Bizmutinit	127	92-172
bornit	103	84-124
bulanžerit	148	116-217
kasiterit	1201	992-1491
halcozin	74	58-98
halcopirit	203	174-245
hromit	1305	1036-1600
cinabarit	77	61-99
kobaltit	1179	948-1367
bakar	92	48-143
kovelin	82	68-110
kubanit	218	150-260
kuprit	204	179-249
enargit	192	133-358
galenit	79	56-116
getit	659	525-824
zlato	65	41-102
grafit	9	4-12
hematit	948	739-1097
ilmenit	629	519-739
lelingit	742	421-963
magnetit	582	480-734
manganit	565	367-766
markasit	1121	824-1288
milerit	281	192-383
molibdenit	32	16-74
nikolit	419	308-533
pentlandit	220	195-238
platina	128	144-146
psilomelan	667	503-813
pirargirit	100	50-127
pirit	1377	1027-1836
pirotin	278	212-363
rutil	1046	978-1280
šelit	361	285-464
srebro	58	39-118
sfalerit	199	128-276
stanin	216	171-307
antimonit	98	42-163
tenantit	358	308-401
tetraedrit	360	291-464
uraninit	765	280-839
volframit	436	285-657

Primer sukcesivnosti operacija koje se preporučuju u postupku merenja mikrotvrđine sa uređajima koje proizvodi kompanija Vickers su:

① Odabiranje odgovarajućeg zrna kristala ili površine za merenje koristeći se objektivima malih povećanja (površina preparata je horizontalna).

② Objektivom sa većim povećanjem (40x), fokusiranjem, proveravamo površinu od mogućih defekata i mana kristala.

③ Postavljamo indenter na odabranu poziciju (jednostavnom rotacijom nosača objektiva).

④ Odabira se odgovarajuće opterećenje (najčešće 100 grama, mada je raspon mase od 10 do 200 grama preporučljiviji za mekše ili tvrde materijale).

⑤ Puštanje utiskivanja u rad (barem 15 sekundi).

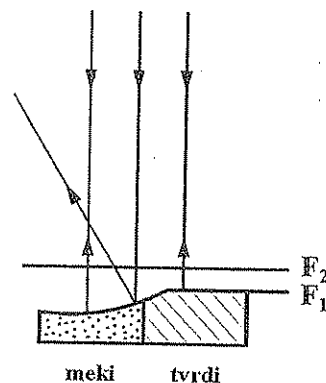
⑥ Pregled otiska pri velikom uvećanju objektiva.

⑦ Merenje dužine dijagonala uz pomoć okular-mikrometra ukoliko je otisak na odgovarajućem mestu.

4.5.12 TVRDINA MINERALA KALB-OVIM METODOM

Reljef minerala može da se odredi na više načina, jedan od njih je tzv. *Kalb*-ova svetlosna crta. Ovaj metod treba primeniti onda kada minerali koji se upoređuju imaju vrlo bliske tvrdine. Analizu treba izvoditi sa objektivima srednjih ili velikih povećanja i pri delom zatvorenoj dijafragmi, što će omogućiti posmatranje u skoro paralelnim upadnim zracima.

Uzrok pojave svetlosne crte (*Kalb*-ove linije) objašnjen je na slici 4.30. Na crtežu je prikazan poprečni presek jednog poliranog preparata na kontaktu mekog (negativnog) i nešto tvrdog (pozitivnog, ispupčenog) minerala. Na granici srastanja ova dva minerala pri poliranju, formira se izvesna kosina u odnosu na ravan poliranja. Upadni svetlosni zraci se vertikalno reflektuju sa horizontalnih površina preparata, a iz zone kontakta, koja je pod izvesnim uglom, zraci se odbijaju koso. Otklon odbijenih zraka će biti utoliko veći što je strmija površina na kontaktu minerala.



Sl.4.30 Ilustracija određivanja relativne tvrdine minerala (*Kalb*-ova metoda)

Sa slike se vidi da iznad minerala sa negativnim reljefom dolazi do veće koncentracije svetlosnih zraka i pri normalnom fokusiranju objektiva (ravan fokusiranja F_1) mi vidimo svetlu crtu na granici ova dva minerala. Ako zatim podignemo tubus objektiva (ili spustimo stočić mikroskopa, zavisno od tehničkog rešenja mikroskopa) tada će se fokusna ravan vidnog polja pomeriti naviše (u ravan F_2) a svetlosna linija kontakta će se pomeriti (useliti) na stranu ili u polje mekšeg minerala. Naravno, ukoliko objektiv spustimo, efekat će biti obrnut.

Kod upoređivanja različito obojenih minerala, kao i minerala sa različitom refleksijom jasno je da će svetlosna crta imati boju tvrdog minerala. U tom slučaju neophodno je samo proveriti njegovo ponašanje kako pri podizanju tako i pri spuštanju fokusne ravni vidnog

Tablica 4.24 Klasični reagensi za strukturna nagrizanja kod nekih rudnih minerala (po Sobolevu, 1990.)

Mineral	Reagensi	Ekspozicija
Antimonit	KOH (20%-ni rastvor)	1-10
Arsenopirit	1 deo KOH (konc.) + 1 deo H ₂ O ₂ (30%-ni rastvor)	10-60
Galenit	HCl (1:2)	2-10
Magnetit	HCl (konc.)	120-300
Markasit	1 deo KMnO ₄ (zasićen vodeni rastvor) + 1 deo KOH (20%-ni rastvor)	20-30
Pirit	Kao predhodni	10-30
Pirotin	HCl (konc.)	
Sfalerit	Pare carske vode	5-20
Halkopirit	Pare carske vode	15-30

Tablica 4.25 Najčešće korišćeni reagensi za površinska strukturna nagrizanja

HNO ₃	Koncentrovana 1 deo kiseline u 1 deo vode
HNO ₃	Rastvor - 2 dela kiseline u 3 dela vode
HNO ₃	Rastvor - 1 deo kiseline u 7 delova vode
Carska voda	3 dela konc. HCl u 1 deo konc. HNO ₃
H ₂ SO ₄	Koncentrovana 1 deo kiseline u 1 deo vode

polja. Kako je već primećeno, što je razlika u tvrdini upoređivanih minerala veća, i nagib kontaktne površine na granici zrna je veći. Pri ekstremno oštrom nagibu ove površine-kontaktna zona, reflektovani zraci neće dospeti u objektiv i svetla crta se neće pojaviti, naime videće se crni rub (crni oreol oko piritu u galenitu). U ovakvim slučajevima se preporučuje metod koso padajućeg svetla.

Za dobijanje pouzdanih rezultata neophodno je kombinovati metod svetlosne crte i koso padajućeg svetla.

Faktori koji utiču na vrednosti mikrotvrdine minerala su:

- ♦ Promena opterećenja
- ♦ Promena strukturnih odnosa minerala
- ♦ Varijacije u orijentaciji minerala
- ♦ Promene sastava minerala
- ♦ Mehaničke i termičke promene tokom geneze minerala

4.5.13 STRUKTURNA NAGRIZANJA

Strukturna nagrizanja se često primenjuju pri identifikaciji minerala, u primenjenoj rudnoj mikroskopiji, radi otkrivanja bližnjena, zonalnosti utvrđivanja granice zrna, utvrđivanja defekata, deformacija i dr., na površinama koje pre tretmana izgledaju vrlo kompaktno. Postupak se bazira na razlici u brzini razlaganja materije po različitim pravcima.

Tehnika nagrizanja poliranih površina minerala prvi put se pominje u radovima *Schneiderhohn-a* (1920.) a detaljnija uputstva za rad daju *Schneiderhohn* i *Ramdohr* (1931.). Ovaj metod je vrlo često jedini način da se nešto sazna o strukturnim karakteristikama nekih minerala.

Nagrizanje (razlaganje) se ostvaruje ili kvašenjem (potapanjem) polirane površine preparata u reaktiv (odnosno nanosi se staklenim štapićem veća kap reaktiva na mesto ispitivanja) ili se polirana strana rudnog preparata postavlja nad grlić retorte u kojoj je odgovarajući reaktiv za neko određeno vreme.

Nagrizenu (najedenu) poliranu površinu preparata ne treba brisati, već reaktiv isprati vodom i osušiti povr-

šinu. Prema tome tehnike nagrizanja - razaranja i narušavaju površine rudnih preparata, tokom vremena tretiranja a eksperimenti se ne izvode nasumice i bez određenog reda. U tablici 4.24 navedeni su kao primer neki reaktivni, kojima se vrši nagrizanje određenih sulfidnih minerala kao i vreme trajanja tretmana.

U tablici 4.25, su prikazani najčešće korišćeni reagensi za površinska strukturna nagrizanja poliranih površina minerala. Tablica 4.25, prikazuje, izvesno modifikovane, podatke prikupljene od *Schneiderhohn* i *Ramdohr* (1931.), *Short* (1940.) i *Craig i Vaughan* (1981.).

Treba napomenuti da postoje izvesni minerali koji korodiraju (strukturno su nagrizeni) prirodno usled oksidacije, te ovu pojavu treba tako i iskoristiti pri identifikaciji. Ova korozija, zamagljenje nastaje zbog neadekvatne zaštite rudnih preparata u kontaktu s vlagom iz vazduha ili isparenjima hemikalija, s tim da je proces sporiji ili brži već u zavisnosti od vremena trajanja izlaganja ovim agensima. Kao izraziti primer su minerali srebra koji vrlo brzo "pocrne" na vazduhu. Kod dijagnostike minerala, a strukturno nagrizanje je jedno od njih, optičkim metodama, od značaja je poznavanje zakonomernosti asocijacija minerala. Tako su, na primer, uobičajeni parovi minerala obrazovani pri raspadu čvrstih rastvora: magnetit-ilmenit, pirotin-pentlandit, halkozin-bornit, halkopirit-kubanit i dr. Kod nepoznatih, predpostavljenih "smeša" obično nalazimo sledeće parove minerala (Tablica 4.26):

Tablica 4.26 Uobičajeni parovi minerala obrazovanih pri raspadu čvrstih rastvora (po Sobolevu, 1990.)

Mineral domaćin	Mineral primesa
Galenit	Sfalerit
Halkozin	Kovelin
Magnetit	Hematit
Rutil	Ilmenit
Pirit	Halkopirit
Sfalerit	Halkozin
Sfalerit	Halkopirit

U zoni oksidacije i pri uslovima hipergene izmene, karakteristični su zakonomerni preobražaji minerala prikazani u tabeli 4.27.

Tablica 4.27 Primeri karakterističnih preobražaja minerala usled oksidacije

Primarni mineral	Sekundarni mineral
Halkopirit	Malahit
Halkozin	Kuprit
Molibdenit	Molibdit
Galenit	Ceruzit
Hematit	Limonit

U rudnim mineralima često nalazimo i sitne uklopke, uključke drugih minerala. Oni mogu biti najčešće - minerali zahvaćeni pri rastu minerala nosioca ili mogu biti "izdvajanja" minerala iz smeše nakon kristalizacije (sfalerit u galenitu) ili na druge načine. Ovakvi uklopki mogu biti razmešteni bilo proizvoljno bilo po zakonomernim predisponiranim pravcima - bližnjenja, cepljivosti i dr. Ukoliko su uklopki razmešteni po određenim pravcima, njihovo prepoznavanje je od koristi pri dijagnostici minerala.

Tablica 4.28 Primeri minerala uklopaka, zahvatanja, izdvajanja u smešama pri strukturnim nagrizanjima minerala nosilaca (po Sobolevu, 1990.)

Minerali uklopki	Mineral nosilac
Argentit	Galenit
Marmatit	Galenit, bornit
Bornit	Halkopirit, halkozin
Burnonit	Galenit
Hematit	Magnetit, hromit
Zlato	Pirit
Ilmenit	Magnetit, rutil, hromit
Kubanit	Halkopirit
Bakar	Kuprit
Pentlandit	Pirotin
Pirotin	Sfalerit, halkopirit
Stanin	Sfalerit
Sfalerit	Stanin
Halkopirit	Sfalerit, stanin

4.5.14 BLIŽNENJE MINERALA

Pojava bližnjenja je karakteristika mnogih rudnih minerala. U sklopu bližnjenja razlikujemo: a. bližnjenja rasta, b. bližnjenja nastala u procesu prekrystalizacije i c. bližnjenja nastala usled pritiska. Najrasprostranjenija su bližnjenja prve grupe.

Bližnjenja rasta su karakteristična za antimonit, sfalerit, halkopirit, markasit, magnetit, ilmenit, hematit i druge. Ovakvi blizanci predstavljeni su pločastim individualima, koji na poliranom preseku daje utisak paralelnih lamela različitih dužina i širina. Pored toga mogu se javiti i drugačiji, kao što su na primer kod burnonita za koga je karakteristično mrežasto ili "parketno" bližnjenje. Najčešće su nepravilno razmešteni i ne nalazimo ih

uvek i u svakom zrnju nekog minerala. Može se reći da se bližnjenje pojavljuje uvek samo u delu minerala.

Bližnjenja prekrystalizacije karakteriše pločasta, lamelarna ili vretenasta, sočivasta forma bliznih jedinki. U njima su često vidljive pojave translatorskih kliznih pomeranja i torzije. Naravno, ovakve pojave se sreću samo u pojedinim zrnima datog minerala. Ovakav tip bližnjenja srećemo kod halkopirita, pirotina, argentita i dr.

Bližnjenja nastala usled visokih pritisa predstavljani su lamelama iste širine, u kojima su često vidljivi nizovi deformacija, kataklaza. Usled dejstva dinamometamorfizma u zrnima se primećuje undulatorno, "talasasto" pomračenje, deformisane rupture bližnjenja, pukotine drobljenja. Kod saflorita su karakteristična trojna srastanja zvezdastih formi tzv. safloritske zvedice.

Kod anizotropnih minerala bližnjenje se zapaža pri ukrštenim nikolima i okretanju stočića mikroskopa, dok kod izotropnih minerala ova pojava je vidljiva strukturnim nagrizanjem ili se zapaža posredno preko različite visine reljefa individua srastanja. Tipičan izotropni mineral, u kome se može sistematski pratiti bližnjenje, jeste sfalerit.

Primeri osnovnih tipova bližnjenja kod rudnih minerala.

1. Prosta lamelarna bližnjenja.
Kasiterit, markasit
2. Polisintetička bližnjenja (najčešće u više pravaca).
Hematit, ilmenit, rutil, milerit.
3. Polisintetička bližnjenja (najčešće u jednom pravcu).
Argentit, halkozin, markasit, silvanit.
4. Kompleksna bližnjenja
Kobaltit, arsenopirit
5. Sinusoidna bližnjenja
Stibnit, bizmutinit, cinabarit, pirotin
6. Zvezdasta bližnjenja (šestougaoe forme).
Lelingit, arsenopirit.
7. Prodorna bližnjenja (interpenetralna).
Markasit, kubanit.
8. Polisintetička bližnjenja (ortogonalna)
Stanin, bornit, halkopirit.

4.5.15 ZONALNOST MINERALA

Zonalna građa je vrlo karakteristična osobina kod mnogih rudnih minerala. Ova osobina, za neke od njih, može da bude vrlo zanačajno dijagnostičko obeležje (na primer za arsenopirit, pirit, kasiterit i dr.). Zone rasta se pojavljuju kao posledica izvesne razlike koje pružaju pojedini delovi agregata pri poliranju. Tako kod minerala galenita, sfalerita, kobaltina i nekih drugih minerala zone rasta su vidljive čak i bez hemijskog nagrizanja, dok se kod niza drugih minerala, zonalnost pojavljuje tek posle hemijskog nagrizanja (magnetit, saflorit, smaltin, sfalerit, arsenopirit). Kod anizotropnih minerala zonalnost minerala je moguće videti već kod njihovog izučavanja ukrštenim nikolima.

Zonarnost može da se javi u sledećim slučajevima:

♦ **Promena hemizma rastvora** tokom rasta kristala. Usled deficita datog elementa i njegovom zamenom nekim drugim u kristalnoj rešetki i kao rezultat toga se obrazuje kristal mešanac. Zonarna građa takvih kristala se ispoljava, redovno, kao područja obogaćena odnosno

osiromašena jednom ili drugom komponentom (bravoit, gersdorfit, ulmanit, arsenopirit, saflorit, ramelzbergit, sfalerit, tetraedrit-tenantit i dr.).

♦ Zonarnost usled ritmičkog rasta (depozicione pauze) kristala, koja se ispoljava u vidu uključenja ili adsorbovanja submiksroskopskih stranih elemenata - inkluzija (pirit, markasit, galenit).

♦ Zonarnost usled periodičnosti smene partija sa uklopcima i partija bez njih.

♦ Pri kristalizaciji gela (pirit, kalcedon, samorodni arsen).

4.5.16 CEPLJIVOST MINERALA

Cepljivost je kod rudnih minerala u poliranim preparatima obično slabo izražena, što je posledica samog načina izrade preparata. Često se cepljivost kod rudnih minerala dobro otkriva posle strukturne korozije (u rezultatu razaranja tanke skrame nastale poliranjem), ili pri oksidaciji, ili deformaciji individua. Najčešće se tragovi cepljivosti i drobljenja javljaju kod kruopnozrnastih agregata i u poliranim preparatima lošije izrade.

Cepljivost, kod rudnih minerala u preparatima, se zapaža u vidu jednog ili nekoliko sistema paralelnih prslina u različitom stepenu jasnoće. Neki minerali imaju od jednog do tri sistema cepljivosti, a u zavisnosti od broja ravni cepljivosti u mineralu, kao i od orijentacije polirane površine mineralnog zrna. Ako minerali poseduju cepljivost u tri ili četiri pravca, onda se na njihovim uglačanim površinama mogu usled brušenja obrazovati figure drobljenja - trougaone, četvorougaoone (kod galenita, pentlandita, sfalerita, magnetita), i one su karakteristične za tesimalne minerale.

Tragovi cepljivosti, pored toga što se otkrivaju strukturnom korozijom, mogu da budu uslovljeni i oksidacionim procesima (oksidacija galenita u anglezit obično se odvija duž pravca tesimalne cepljivosti galenita), kao i procesima dinamometamorfizma. Važno je napomenuti, da se kod rudnih minerala u poliranim preparatima, na njihovim uglačanim površinama vrlo često mogu zapaziti ogrebotine - odnosno tragovi nastali u procesu brušenja, koji obično zahvataju po nekoliko individua jednog istog minerala, a nemaju i pravilnu orijentaciju. Ovi tragovi, odgovaraju takozvanoj "cepljivosti" nastaloj brušenjem (posebno karakteriše meke minerale ako se nalaze u asocijaciji sa tvrdim - piritom, arsenopiritom i dr.).

4.5.17 FORME ZRNA

Forma odnosno oblik zrna predstavlja vrlo značajnu karakteristiku pri njihovoj identifikaciji, kako pri propuštenoj tako i pri odbijenoj svetlosti. Naravno, da je za ovakva ispitivanja, neophodno istražiti više preseka mi-

nerala. Najčešće je karakteristika idiomorfni zrna minerala veća snaga rasta i znatna tvrđina. Uopšte razlikuju se izometrična i različito izdužena zrna. Izometričnu formu pokazuju - pirit, magnetit (na kvadratnim, heksagonalnim i trouglastim presecima), a arsenopirit (na rombičnim presecima), izometričnu formu (prizmatičnu, stubičastu, igličastu, pločastu) pokazuje antimonit; arsenopirit (pokazuje prizmatičnu); džemsonit, rutil (pokazuju igličastu); hematit, molibdenit (pokazuju tabličastu formu) i td.

4.5.18 RAD U IMERZIJI

Kod izučavanja rudnih minerala vrlo često se primenjuju i tzv. imerzioni preparati odnosno minerali se posmatraju u nekoj imerziji. Kao imerziona sredina najčešće se koriste špirit, (n=1,360), glicerol (n= 1,500), kedrovo ulje (n=1,516) i metilen jodid (n= 1,743). Korišćenjem imerzionih tečnosti postiže se rast pokazatelja prelamanja sredine iz koje svetlosni snop pada na poliranu površinu preparata, usled čega se povećava jasnoća slike odnosno tačnost, kao i moć razlaganja objektiva. Na ovaj način, korišćenjem imerzionih objektiva (uvek označenih jednim crnim prstenom) i nekih imerzionih tečnosti omogućuje se dobijanje, ne nekih značajnih uvećanja, nego dovode do značajnog pojačavanja optičkih efekata ("kontrastnosti"), boje minerala u njihovom prirodnom svetlu, birefleksije, anizotropnosti, intenziteta i boje unutrašnjih refleksa i dr. Uočeni efekti će postati shvatljiviji, ako se izjednače obrasci Frenelija-a i to za slučaj, da svetlost pada na poliranu površinu iz imerzije vazduh i iz neke druge imerzije sredine, tako imamo:

$$R_v = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}$$

$$R_{im} = \frac{(n-n_{im})^2 + k^2}{(n+n_{im})^2 + k^2}$$

gde su:

R_v i R_{im} - pokazatelji refleksije minerala u vazduhu ($n=1$) i imerziji ($n_{im}>1$);

k - koeficijent absorpcije.

Jasno je da je $R_v > R_{im}$, jer je $n_{im} > 1$. Promena R zavisi i od k : kod prozračnih minerala vrednost k teži ka nuli i prema tome najviše smanjenje R_{im} će biti kod prozračnih i providnih minerala. Prema tome što je manji pokazatelj prelamanja prozračnog minerala tim je veće smanjenje njegovog pokazatelja refleksije. U slučaju da je n blisko sa n_{im} , mineral postaje nevidljiv u toj imerziji. Što se tiče neprozračnih (apsorbirajućih) minerala, R u imerziji kod njih opada mnogo blaže odnosno ne tako naglo.

Tablica 4.29 Primeri formi zrna i njihovi tipični preseki kod nekih minerala

Forme zrna	Preseci	Minerali
Izometrična	kvadratni, heksagonalni, trouglasti	pirit, magnetit, arsenopirit
Izdužena	prizmatična, stubičasta, pločasta, igličasta, šestougaoana, tabličasta	antimonit, hematit, rutil, hematit
Ksenomorfna	bilo koji	marmatit, halkopirit
Kolomorfna	zonarni	minerali Fe, Mn, Al

U imerziji kontrastnost osvetljenosti dva susedna zrna vizuelno je primetna već pri 2 % (relativnih). Merenje refleksije kao i birefleksije izvedeno u imerziji je prema tome mnogo tačnije. Pošto birefleksija u imerziji relativno raste, to će i efekat anizotropije u imerziji biti znatno izraženiji (pri ukrštenim nikolima). Minerali sa crvenim unutrašnjim refleksima (cinabarit, hematit, kuprit) neznatno pojačavaju crvenu boju refleksa a vrlo jako plavu. S porastom disperzije minerala raste i njihova refleksija tj. minerali sa crvenim unutrašnjim refleksima (propuštaju crvenu) morali bi reflektovati plave i zelene boje. U imerziji se ove pojave pojačavaju tako da kod minerala, kod kojih su u vazduhu unutrašnji refleksi nevidljivi ili slabo vidljivi, oni su jasni u imerziji (antimonit, burnonit i dr.).

4.5.19 METODE MERENJA VELIČINE MINERALNIH ZRNA

Merenje mineralnih zrna (kristala, agregata, prožilaka, agregata, inkluzija i dr.) je od velikog značaja pri karakterizaciji strukturnih i teksturnih osobina sirovine posebno tokom praćenja oslobađanja minerala u procesima PMS. Najjednostavniji pribor za merenje je okular-mikrometar. U ravni žižne daljine okular-mikrometra postavljena je staklena pločica na kojoj je ugraviran razmernik dužine 1 cm podeljen na 10 odnosno 100 delova. Prstenom koji nosi sočivo okulara izoštrimo u vid-

nom polju skalu mikrometra, zatim određujemo broj podeoka na okular-mikrometarskoj skali koji odgovara željenoj odnosno merenoj dužini. Svaki deo okular-mikrometarske skale odgovara pri datom uvećanju određenoj veličini koja je utvrđena - baždarenjem pri određenim uvećanjima mikroskopa. Za određivanje veličine podeoka na okular-mikrometru, za baždarenje koristi se takozvani objekt-mikrometar. On je predstavljen staklenom ili ispoliranom metalnom pločicom na čiju je površinu urezana duž veličine 1 mm i podeljena na 100 delova. Pri određivanju veličine podeoka na okular-mikrometarskoj skali, objekt-mikrometar se postavlja na stočić mikroskopa umesto poliranog preparata i upare se "nule" obe skale a zatim izbroji određeni broj (10 ili 20) podeoka skale objekt-mikrometra i odgovarajući broj podeoka okular-mikrometra. Na ovaj način se određuje veličina jednog podeoka okular-mikrometra.

✱ **Primer.** 14 podeoka okular-mikrometarske skale odgovaraju (preklapa se sa) 16 podeoka objekt-mikrometarske skale; kako svaki podeok objekt-mikrometra iznosi 0,01 mm, to će i podeok okular-mikrometarske skale biti ravan $0,16/14 = 0,011$ mm.

Radi lakšeg i bržeg praktičnog rada, korisno je unapred sastaviti tablicu sa vrednostima podeoka okular-mikrometarskih skala za različita uvećanja mikroskopa (kombinacija uvećanja okulara + objektiva). U narednoj tablici 4.30 prikazane su vrednosti veličine jednog podeoka pri različitim uvećanjima mikroskopa (za školski mikroskop tipa MIN-9).

Tablica 4.30 Vrednost jednog podeoka okular-mikrometarske skale pri uvećanju okulara od 7x i različitim uvećanjima objektiva (za školski mikroskop MIN-9)

Uvećanje okulara	UVEĆANJE OBJEKTIVA				
	4,7 x	9 x	11 x	21 x	30 x
7 x	35 μ m	18 μ m	15 μ m	8 μ m	5 μ m

4.6 KVANTITATIVNA ANALIZA U RUDNOJ MIKROSKOPIJI

4.6.1 TEHNIKE MERENJA

Rudnim polarizacionim mikroskopom mogu da se vrše, kao što smo videli, i određena merenja. Osim rutinskih, svakodnevnih pojedinačnih određivanja krupnoće zrna, agregata kristala, veličine uklopaka i drugih merenja, često smo u prilici, da vršimo obimna i dugotrajna snimanja posebno u aplikativnoj – procesnoj minerologiji. U PMS imamo potrebe, da pored identifikacije vršimo i karakterizaciju minerala (po nizu osobina) u proizvodima koncentracije – ulaznoj sirovini, koncentratima, jalovini i međuproduktima. Ovakva merenja zahtevaju puno pažnje, rutine i vremena a najčešće se odnose na praćenje zastupljenosti i međusobnih odnosa minerala ili oslobađanja pojedinih komponenti iz sirovine, analize uzroka gubitaka kao i analize neadekvatnog iskorišćenja pojedinih minerala. Uslovi za rad, kod ovakvih ispitivanja, su znatno kompleksniji (u odnosu na konvencionalna mineraloška ispitivanja), i spadaju u najteže i najobimnije, upravo zbog činjenice da se radi o dezintegriranoj, fragmentiranoj rudi (u procesu usitnjavanja a kasnije koncentracije) i na taj način u izvesnom smislu

otežanim uslovima za samu identifikaciju. To se naročito odnosi na obimna merenja u serijama preparata (sve krupnoće, klasiranog uzorka) tokom ispitivanja proizvoda koncentracije. U daljem tekstu će biti razmotrene tehnike merenja pri kvantitativnoj analizi u rudnoj mikroskopiji.

Komparativni pregled metoda kvantitativnih mikroskopskih analiza koje se mogu koristiti u PMS, bilo pri analizi zastupljenosti minerala u sirovini bilo da je reč o procesu praćenja oslobađanja pojedinih minerala pre i u toku same koncentracije, prikazan je u tablici 4.31.

4.6.2 DE LESSE-OV METOD (PLANIMETRIJSKI)

Prva registrovana primena kvantitativnog postupka analize slike datira čak u 1848. godinu. *De Lessé* (1848.), Francuski mineralog, postavio je metod određivanja volumetrijske zastupljenosti odabranog minerala u rudi ili steni, merenjem površina koje zauzima taj mineral na svakom slučajnom preseku (ili poliranom briketiranom rudnom preparatu) kroz odabrani komad rude.

Tablica 4.31 Komparativni pregled metoda merenja pri mineraloškim analizama i određivanju stepena oslobađanja minerala

Metod merenja	Objekti merenja	Postupak merenja	Parametri	Mogućnost transformacije
De Lesse-ov metod	Rudni ili petrografski	Planimetrijski (površine preseka zrna)	Zapreminski ili maseni %	Maseni ili zapreminski %, sadržaji
Rosival-Schand-ov metod	Rudni ili petrografski	Linijski (dužine odsečaka)	Zapreminski ili maseni %	Maseni ili zapreminski %, sadržaji
Glagolev-Chayes-ov metod	Rudni ili petrografski	Tačkasti (mreža tačaka)	Zapreminski ili maseni %	Maseni ili zapreminski %, sadržaji
Fleet-ov metod	Mineralna zrna: slobodna ili briketirana	Broj zrna (sva zrna)	%, prema broju zrna	ne preporučuje se
Van der Plas-ov metod	Mineralna zrna: slobodna ili briketirana	Broj zrna (sva zrna unutar trake, šlajfne)	%, prema broju zrna	ne preporučuje se
Galehouse-ov metod	Mineralna zrna: slobodna ili briketirana	Broj zrna (sva zrna koja su na pravcu tri končanice)	%, prema broju zrna	ne preporučuje se

Značaj *De Lesse*-ovog pionirskog rada je u tome da je on prvi shvatio važnost kvantitativne mineraloške analize, kao i to da je bio prvi koji je ukazao na povezanost između procentne zastupljenosti različitih minerala u preparatu i njihove volumetrijske zastupljenosti u datoj sirovini.

Njegov metod merenja zastupljenosti površina je bio vrlo spor i nekomforan posao, mada se može reći pouzdan postupak, a mogao je biti primenjen samo na stene ili rude sa krupnozrnim mineralizacijom odnosno orudnjenjem. On je, naime, obeležio rubove, odnosno konture svih zrna odabranog minerala na komadu masnog, prozirnog platna (tanka svila) ili papira kojim je potpuno prekrrio površinu preseka ispitivanog komada rude. Zatim je tako iscrtano platno ili papir zalepio na komad tanke kalajne folije istih dimenzija kao i otisak platna ili papira a obeležene konture, po liniji, makazama pažljivo isekao sve otiske čije površine predstavljaju odabrani mineral i sve isečene komade iste mineralne vrste merio na analitičkoj vagi. Iz odnosa izmerenih masa ovih komadića kalajne folije, koji predstavljaju odabrani mineral, prema ukupnoj masi kalajne folije dobio je zadovoljavajući proračun udela odnosno zastupljenosti površine odabranog minerala na ukupnoj površini preseka.

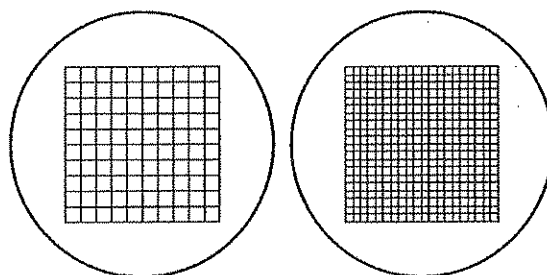
De Lesse je tad još pretpostavio (a što je kasnije bilo potvrđeno), da je zastupljenost površina preseka ekvivalentna volumetrijskoj zastupljenosti datog minerala u sklopu specimena, pod pretpostavkom:

- da je presek, komada rude na kome se vrši snimanje slučajna (odnosno da se pravac preseka ne poklopi sa nekim strukturnim ili tekturnim karaktistikama ispitivanog primerka);
- da je merena površina odnosno površina preseka mnogo veća od pojedinačnih zrna agregata kristala snimanog minerala;
- da su slučajni preseki dovoljno veliki da bi se odgovarajuće statistički obezbedio dovoljan broj zrna koja se mere.

Osnovna saznanja koja je svojim radom, *De Lesse*, ostavio bila su ispravna, ali nije postojao način, u njegovo doba, da se postupak uprosti ili bar reducira obim posla i vremena koje zahteva rad na izvođenju takvog snimanja. Naravno, nije iznenađujuće da njegov originalan metod planimetrijskih snimanja nije imao uspeha

niti je bio prihvaćen kod geologa i mineraloga u aplikativnoj mineralogiji.

De Lesse-ov princip merenja i osnov saznanja danas je u potpunosti iskorišćen u modernim, automatskim uređajima - analizatorima slike, gde uz razvijenu tehnologiju računarstva i elektronike nije mnogo potrebno učešće čoveka. Planimetrijsko određivanje kvantitativne zastupljenosti minerala u rudi odnosno sirovini danas nosi ime kao *De Lesse*-ov metod. Najčešće se u aplikativnoj rudnoj mikroskopiji izvodi optičkim mikroskopom uz pomoć okularne mrežice različite rezolucije. Sl.4.31.



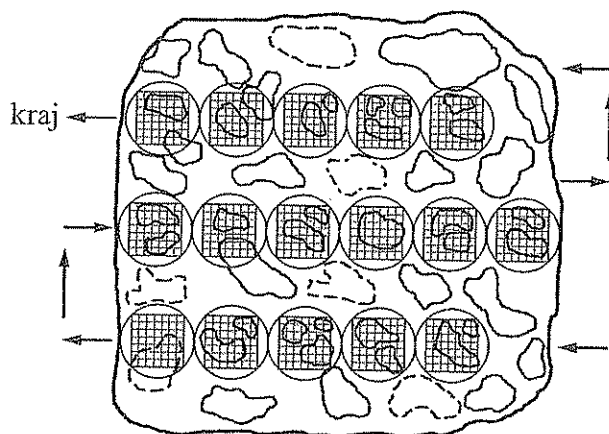
Sl.4.31 Okular-mikrometerska mrežica za planimetrijska merenja

Planimetrijski metod je relativno najtačniji ali istovremeno i najsporiji postupak kvantitativne mikrometrijske analize minerala. Pri ovom postupku se neposredno snimaju preseki površina mineralnih zrna na poliranom rudnom preparatu, uz pomoć pomenute okularne mrežice. U ravan fokusiranja okulara je postavljena kvadratna mreža (mreže mogu biti različite gustine građenja) koja je predhodno baždarena (uz pomoć objekta mikrometra) za aktuelno uvećanje mikroskopa.

Merenja se vrše na sledeći način: rudni preparat se postavi na stočić mikroskopa fiksira i to tako da se prva tačka profilne linije nalazi na gornjem levom rubu preparata. Zatim se preparat pomera u levo toliko da se rubovi susednih vidnih polja skoro dodiruju, ili delom preklapaju, čineći tako niz čiji su centri postavljeni duž linije profilisanja. Sl.4.32.

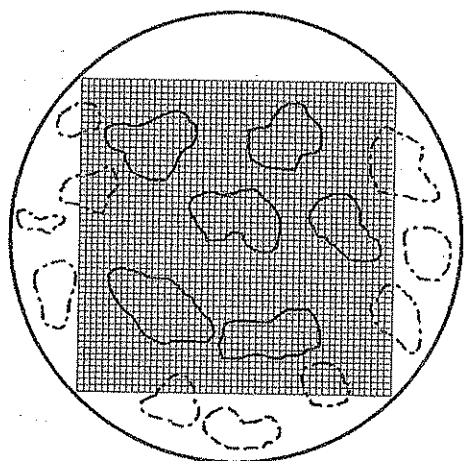
Na taj način se postupak ponavlja, od jednog do narednog vidnog polja dok se ne prekrije celokupna površina rudnog preparata ili ako je predhodno određen, deo

te površine, kao reprezentanta. Na kraju se za svaki mineral posebno, sabiraju površine kvadrata iz svih polja snimanja za taj preparat i postavljaju u odnos sa ukupnom sumom i izražava na kraju u procentima (površina). Na taj način se pojedinačno izračunava zastupljenost datih minerala u preparatu planimetrijski i kao što je već rečeno rezultati se mogu smatrati ekvivalentom zastupljenosti, od čega je *De Lesse* i pošao.



Sl.4.32 Ilustracija "prekrivanja" polirane površine rudnog preparata duž zadatih profilskih linija snimanja

U svakom vidnom polju se utvrdi broj kvadrata koji prekriva površine preseka određenog minerala, posebno, kao što je to prikazano na slici 4.33. Naime, sumira se broj celih ćelija-kvadrata kao i zbir procenjenih delova kvadrata koji prekrivaju preseke zrna datog minerala.



Sl.4.33 Ilustracija merenja površina preseka zrna minerala, predhodno baždarene okular-mikrometerske mrežice.

Masena zastupljenost minerala u preparatu se dobija kada se volumetrijski sadržaji (V,%) pomnože odgovarajućim gustinama minerala koji se ispituju. Tačnost planimetrijskih snimanja zavisi od toga kolika je površina snimanja prekrivena. Naime, ukoliko je ona veća i tačnost se, sa gledišta statistike, povećava a greška određivanja smanjuje.

❖ ❖ ❖

❖ Primer: izračunavanje zastupljenosti minerala u uzorku, gde su merenja vršena planimetrijski, korišćenjem okularske mrežice (na istom principu radi i savremeni analizator slike pri analizi modalnog mineralnog sastava), prikazan je u narednoj tablici 4.32.

Treba obratiti pažnju na još jedan izvor grešaka pri merenju. Ako kvantitativnu analizu vršimo na rudnom preparatu u kome su minerali različite tvrdine, znači i različite sposobnosti poliranja i visine reljefa – pri analizi će se dobiti nešto povećana količina tvrdih minerala. Da bi se ovo izbeglo preparat se ne polira do navjše finocne.

Kod mineraloških analiza produkata koncentracije, karakteristična osobina materijala koji se analizira je neujednačen granulometrijski sastav, te se obično prvo uzorak usko klasira, a merenja se rade na svakoj klasi krupnoće pojedinačno. Uz pomoć mikrorazdeljivača uzima se oko 2–4 cm³ materijala po specimenu. Merenja koja padaju u intergranularni prostor – bakelit ili pleksiglas, se pri proračunu ne uzimaju u obzir. Izračunavanje se vrši na masene procenete.

4.6.3 ROSIWAL-SHAND METOD (LINIJSKI)

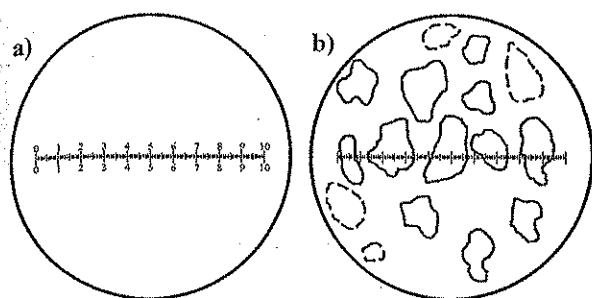
Ovaj metod kvantitativnog određivanja zastupljenosti i odnosa pojedinih minerala u briketiranim (i/ili drugim) preparatima nazvan Rosiwal-Shand metod je tipičan linijski postupak i predstavlja preteču mnogim drugim, sličnim, kasnije razvijenim metodama. Naime, *Rosiwal* je daleke 1898 godine razradio ovaj linijski metod kvantitativne mikrometrijske analize minerala.

Utvrđivanje zastupljenosti minerala, u rudnim ili petrogenim preparatima, izvodi se snimanjem i sumiranjem ukupne dužine pojedinačnih odsečaka preko odabrane mineralne faze, uz pomoć okularne mikrometerske baždarene skale ili končanice (ili okular-mikrometra), duž paralelno postavljenih profilskih linija po poliranoj površini preparata, čija se gustina eksperimentalno predhodno odredi, a uslovljena je krupnoćom zrna odnosno čestica. (Sl.4.34).

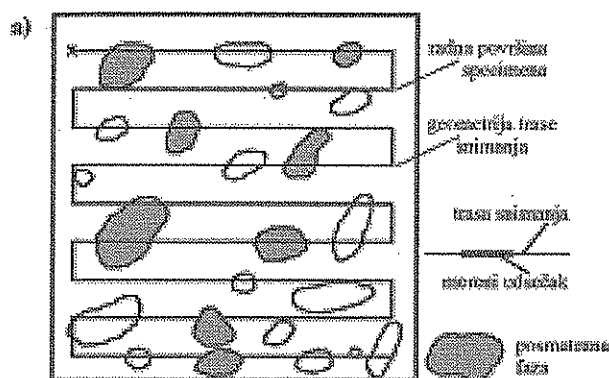
Snimanja Rosiwal-Shand-ovim metodom, po gore iznetom postupku, mogu da se sprovedu na više načina što zavisi od pribora sa kojima se radi i od čega će zavistiti i brzina rada.

Tablica 4.32 Obrada podataka merenja i izračunavanje zastupljenosti minerala u uzorku

Minerali	Broj pomeranja vidnog polja (okularska mrežica 20x20 polja)				Ukupno Kvadrata	Zastupljenost minerala, %
	1. merenje	2. merenje	3. merenje	4. merenje		
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Pirit	53,5	83,5	97,5	61,5	296,0	18,5
Sfalerit	245,0	229,5	247,5	221,0	943,0	59,0
Galenit	45,0	—	4,5	32,5	82,0	5,1
Kvarc	56,5	87,0	50,5	85,0	279,0	17,4
Suma:	400	400	400	400	Σ 1600	100,0



Sl.4.34 Okular-mikrometerska skala (a.) za određivanje linijske zastupljenosti minerala u preparatu, merenjem odsečaka duž postavljene profilne linije (b.).



Sl.4.35 Ilustracija merenja odsečaka preseka zrna minerala, predhodno baždarenom okular-mikrometerskom skalom: a-trasa snimanja dužina odsečaka preko preseka mineralnih zrna; b-merenja odsečaka na neporemećenom uzorku; c-način prekrivanja polirane površine u postupku merenja.

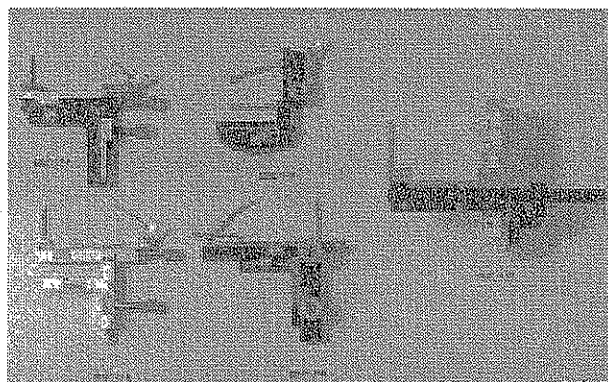
□ Osnovna ideja je slična onoj koja se koristi i kod snimanja planimetrijskim postupkom samo što se merenja vrše okular-mikrometerskom skalom, duž paralelno

postavljenih linija profilisanja na ekvidistantnim rastojanjima. Sl. 4.35 a.

□ Snimanja kvantitativne zastupljenosti minerala može da se sprovede i uz pomoć *Hiršvald*-ovog okulara na sličan način kao i sa okular mikrometerskom skalom.

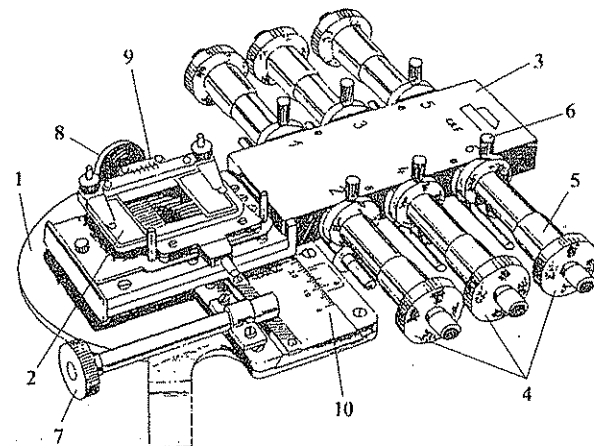
□ Linijska snimanja mogu se izvršiti, kao što je već rečeno i uz pomoć okular mikrometerskih mrežica (istih onih koje se koriste u planimetrijskim snimanjima). Mrežice mogu biti različite gustine rastera a upotreba će zavistiti od krupnoće materijala koji se ispituje u rudnom preparatu.

□ Snimanja zastupljenosti minerala, u nedostatku gore pomenutih pribora, određenih okulara, mogu se izvršiti i uz pomoć obične končanice na okularu i očitavanju odsečaka na X-Y mehaničkom stočiću (Kroictiš). (Sl.4.36).

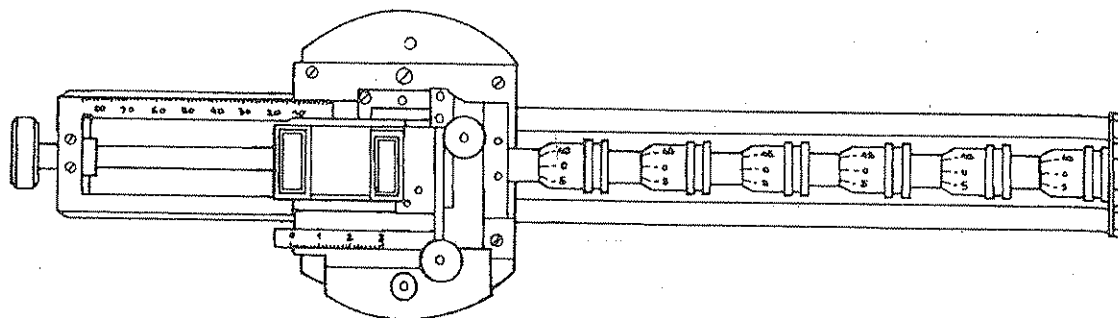


Sl.4.36 Mehanički stočić za linearna merenja (Carl Zeiss, Inc.).

□ Naravno, i kao najpoznatiji uređaj za linijska merenja je svakako Shand-ov integracioni stočić, ili uređaji istoga tipa drugih proizvođača (integrator Andin-a i dr.). (Sl.4.37 i 4.38) Shand-ov integracioni stočić sa šest mikrometerskih zavrtnjeva, nosačem preparata, zavrtnjem za "prazan hod" odnosno itergranularno rastojanje kod briketiranih rudnih preparata, kao i zavrtnjem za određivanje međuprofilskih rastojanja.



Sl.4.37 Integracioni stočić Shand-a (Integrations Tisch, Ernst Leitz, Wetzlar). Legenda: 1-stočić, 2-nosač preparata, 3-mehanizam sa prizmama, 4-mikrometerski zavrtnjevi, 5-cilindar nonijusa, 6-kočnica, 7-zavrtnj za podešavanje rastojanja između profilskih linija, X-osa, 8-zavrtnj za intergranularno rastojanje, nonijus Y-ose, 9-nonijus X-ose



Sl.4.38 Integracioni stočić Andin-a (Mikrometarski zavrtnji postavljeni u nizu, na istoj osi).

Nakon završenog kompletnog profilisanja površine preparata (jednog ili više njih) sabiraju se svi odsečki preko odabranog minerala i postavljaju u odnos sa ukupnom dužinom profilskih linija (profilisanih linija).

Odnos dela onih linearnih odsečaka koji padaju preko određenog minerala i ukupne dužine profilisanih pravaca daju količnik o zastupljenosti (linijske) tog minerala u specimenu.

$$L = \frac{L_A}{L_T} = \text{linearna zastupljenost minerala A.}$$

gde su:

L_A - ukupna dužina odsečaka minerala A.

L_T - ukupna dužina profilskih linija.

Masena zastupljenost datog minerala na osnovu podataka merenja linijskom metodom iskazuje se:

$$M_i = \frac{l_i \cdot \rho_i}{l_1 \cdot \rho_1 + l_2 \cdot \rho_2 + l_3 \cdot \rho_3 + \dots + l_n \cdot \rho_n} (\%)$$

odnosno

$$M_i = \frac{l_i \cdot \rho_i}{\sum l_n \cdot \rho_{rude}} (\%)$$

Iz ovih podataka se dobija i zastupljenost minerala u datom preparatu (linijska ili površinska zastupljenost). Linijska zastupljenost ili udeo minerala može da se prikaže i kao ekvivalent zapreminske zastupljenosti datog minerala za ceo analizirani uzorak. *Rosiwal-Shand*-ov metod je matematički sasvim ispravan a takođe je i neporedivo jednostavniji za izvođenje.

Osnovna teorijska razlika između postupka kojim se služi *Rosiwal* i postupka koji je zagovarao *De Lesse*, je u tome da dok je *Rosiwal* shvatao uzorak odnosno specimen površinom, a merio linearne odsečke, dotle je *De Lesse* merio stvarne (potpune) površine preseka na preparatima. Potvrdu i ispravnost mikrometrijskih snimanja linearnih odsečaka duž profilskih linija (linija profilisanja, pravaca profilisanja) pri ispitivanju relativnih površina matematički je izveo i dokazao *Chayes* (1956.). Najbolja potvrda *Rosiwal*-ovog postupka data je uvođenjem, doterane verzije, integracionog mikrometrijskog uređaja od *Shand*-a (1916.), a odatle, je kasnije sam postupak dobio ime kao *Rosiwal-Shand*-ov metod. Da bi se ova merenja sprovedla brže, lakše i udobnije (i ublažile poteškoće manuelnog rada), razrađena su mnoga tehnička, pretežno mehanička, rešenja za brži i automatizovaniji rad.

Shand je izumeo postupak pri kome se rudni preparat, određenim mehanizmom, koji je montiran na stočić mikroskopa, pokreće u prostoru vidnog polja mikroskopa a uz pomoć končanice (ili okular-mikrometra) prati

snimanje odsečaka duž postavljenih profila. Kasnije modifikacije *Shand*-ovog uređaja od drugih istraživača rezultiralo je u nekoliko tipova poluautomatskih mehaničkih uređaja. Jedan od najpopularnijih svakako je Integracioni stočić od E. Leitz, Inc., kompanije. Takođe su poznati i uređaji firme Clay-Adams, Inc., stočić Andina i drugi.

Shand-ov stočić ima šest mikrometarskih zavrtneva tako da se sa svakim od njih, nezavisno, može pokretati preparat pod mikroskopom a istovremeno sa svakim od mikrometarskih zavrtneva registruje se automatski dužina odsečaka na jedan mu dodeljen mineral, sve dok se tokom snimanja određena mineralna faza nalazi u centru končanica vidnog polja.

Sve do 1950. godine metod *Rosiwal-Shand* je bio glavni postupak kvantitativne mineraloške analize. Već 1956. godine *Chayes* je procenio da popularnost metoda *Rosiwal-Shand*, opada toliko da je samo polovina analiza u SAD izvedena ovim postupkom. Glavni razlog što je opala popularnost *Rosiwal-Shand*-ovog metoda je u stvari nagli porast popularnosti novog *Glagolev-Chayes* metoda. Danas se ovaj metod koristi vrlo malo, a i proizvođač E. Leitz, Inc., je već davno prekinuo sa proizvodnjom integracionih stočića.

Kao i za planimetrijska merenja tako i kod ovog postupka pomenuti odnosi su važeći pod sledećim pretpostavkama:

☐ Površina sečenja stene, rude ili briketiranog preparata na kojoj se vrši snimanje mora biti slučajna i reprezentativna.

☐ Površina preseka mora biti dovoljno velika da bi se obuhvatio adekvatan broj zrna ili čestica odabranog minerala pri snimanju.

☐ Linija profilisanja treba da je mnogo puta duža od prečnika najkrupnijih zrna.

☐ Da ni jedno zrno ne bude uvršćeno u merenje više od jednog puta (da ne bude presečeno sa više od jedne linije profilisanja).

☐ Orijentacija pravaca profilisanja ne sme se pokloniti sa bilo kakvim strukturnim ili teksturnim lineacijama.

Danas su razvijeni takvi laboratorijski uređaji koji potpuno automatski vrše snimanje, po unapred programiranim putanjama, a potom dobijeni podaci se obrađuju u računarima i štampaju željeni podaci. Ovakvi moderni analizatori slike nude čitav niz podataka na osnovu ovakvih snimanja, ne samo kvantitativnu zastupljenost već i granulometrijsku analizu, raspone krupnoće, srednje prečnike, kako zrna-agregata kristala tako i čestica, zatim specifične slobodne površine i druge parametre geometrizacije minerala.

Tablica 4.33 Izračunavanje zastupljenosti (zapreminske i masene) minerala u uzorku

Minerali	Ukupna dužina odsečaka (mm)	Zapreminska zastupljenost (%)	Gustina minerala, ρ	$V_n \times \rho_n$	Maseni udeo minerala, %
1.	2.	3.	4.	5.	6.
Pirotin	1848	60,43 ^{1*}	4,7	284,02	66,49 ^{2*}
Halkopirit	156	5,10	4,2	21,42	5,01
Sfalerit	102	3,34	4,8	16,03	3,75
Magnetit	48	1,57	5,2	8,16	1,91
Galenit	904	29,56	3,3	97,55	22,84
Suma:	3058	100,00	4,27	427,18	100,00

$$1^* V_i = \frac{l_i}{\Sigma l_n} = \frac{1848 \cdot 100}{3058} = 60,43(\%)$$

$$2^* M_i = \frac{V_i \cdot \rho_i}{\Sigma (V_n \cdot \rho_n)} = \frac{284,02 \cdot 100}{427,18} = 66,49 (\%)$$

* Primer: postupak utvrđivanja zastupljenosti minerala linijskom metodom dat u narednoj tablici, 4.33.

Uslovi za kvantitativnu mineralošku analizu su:

• Priprema poliranog mikroskopskog preparata (rudnog ili petrografskog).

• Jedna makrofotografija – pomoću ovakve fotografije mogu se ilustrovati mineraloški odnosi i osobnosti rude (ili koncentrata) sa osnovnim makroskopskim crta-ma.

• Označavanje dijamantskom iglom mesta posebno interesantnih za mikrofotografije ili druge vidove ispitivanja (rendgenostrukturalna, mikrosonda, laserska i druga ispitivanja).

Tehnika kvantitativne mineraloške analize metaličnih minerala, u izvesnom stepenu, zavisi od prirode izučavanog materijala. Osnovni uređaji koji se najčešće koriste pri analizi čvrstih mineralnih sirovina su: brojači tačaka i linijski integratori neprekidnog dejstva. Oba uređaja se koriste za postizanje jednog te istog cilja: određivanje procentualnog učešća svake od prisutnih mineralnih komponenti u odnosu na celokupnu površinu rudnog preparata. Zapreminska zastupljenost je ekvivalentna površinskoj.

Postoji više tipova linijskih integratora neprekidnog dejstva. Jedan od njih je integracioni stočić–specijalni pokretni stočić mikroskopa, sa mogućnošću pokretanja duž dve upravne (x i y) ose sa ugraviranim nonijusima i lenjirom. Tako se jednim zavrtnjem vrši kontrola kretanja držača pločice koja nosi preparat u smeru napred-nazad, dok se sam stočić može pokretati jednim od šest bočnih mikrometarskih zavrtnjeva. Karakteristike integracionih stočića su da imaju do šest brojača, sa principom rada mikrometarskog zavrtnja. Svaki mineral se registruje sa po jednim zavrtnjem, izuzev slučaja kada je broj minerala veći, u kom slučaju se jedan brojač rezerviše za "ostali minerali".

Polirani preparat se postavlja na nosač–pločicu i fiksira na stočiću mikroskopa. Svaki presek zrna minerala (u briketiranom preparatu) mora se postaviti u presek končanica okulara i pomera uz pomoć odgovarajućeg mikrometarskog zavrtnja. Na taj način se sva mineralna zrna, koja leže duž profilske linije, registruju i mere odgovarajućim mikrometarskim zavrtnjem. Suma svih preseka mineralnih zrna daje ukupnu dužinu preseka. Pomeranjem preparata napred–nazad rudni preparat se

postavlja na drugu profilsku liniju, i postupak merenja preseka se ponavlja.

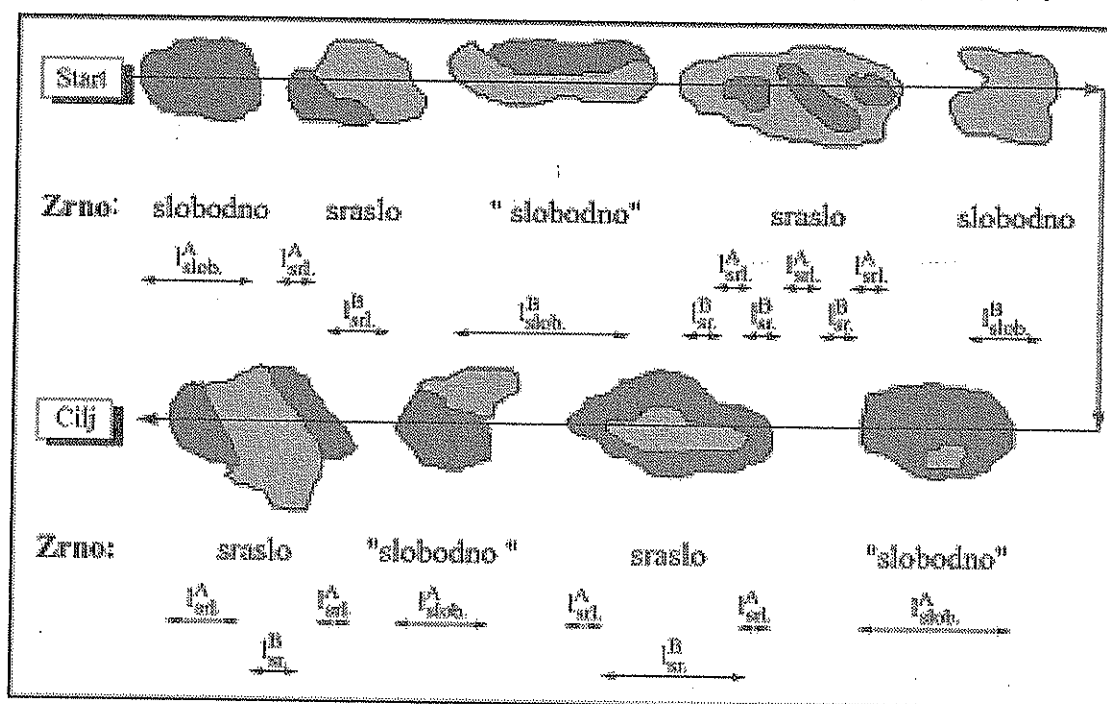
Po istom metodu se vrši snimanje (merenje) oslobođenosti nekog minerala nakon usitnjavanja sirovine (Sl. 4.39).

4.6.4 GLAGOLEV-CHAYES METOD (TAČKASTI)

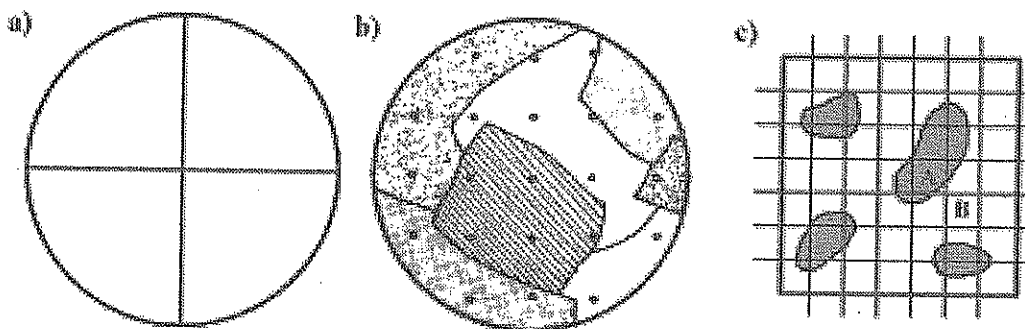
Glagolev-Chayes metod kvantitativne mikrometrijske mineraloške analize je danas najrašireniji metod izučavanja rudnih i petrogenih preparata. *Glagolev* (1933.), a nezavisno od njega i *Thompson* (1931.), predlaže da se umesto kontinualnog merenja duž pravaca međusobno paralelnih profilskih linija postupak može uprostiti a sama procedura znatno ubrzati, snimanjem i registrovanjem tačaka postavljenih na jednakim rastojanjima duž tih istih profilskih linija (sl.4.40). Tačke predstavljaju preseke končanica u vidnom polju ispod kojih su određeni, ranije identifikovani odabrani minerali, a broj tačaka se automatski registruje zasebno za svaki od snimanih minerala (Sl.4.41).

Iako je sam metod bio publikovan na engleskom (*Glagolev*, 1934.) on nije odmah postao popularan u zemljama engleskog jezičkog područja upravo zbog ograničene mogućnosti nabavke opisanog mehaničkog uređaja–brojača. Brojač tačaka stvarno stiže sve veću popularnost tek posle objavljenih radova *Chayes*-a (1949.), gde je opisao metod i modifikacije za postojeći uređaj mehaničkog stočića koji je mogao biti korišćen za postupak *Glagolev*-a. Danas postoji veliki broj različitih konstrukcija "brojača tačaka" kod različitih proizvođača (Sl.4.42). Jedna jednostavna konstrukcija stočića (E. Leitz, Inc.,) sa promenljivim prstenovima – zavrtnjima za različite veličine skokova između susednih tačaka, a koji funkcioniše po sistemu "klik–klik", prikazan je na slici 4.42 a.

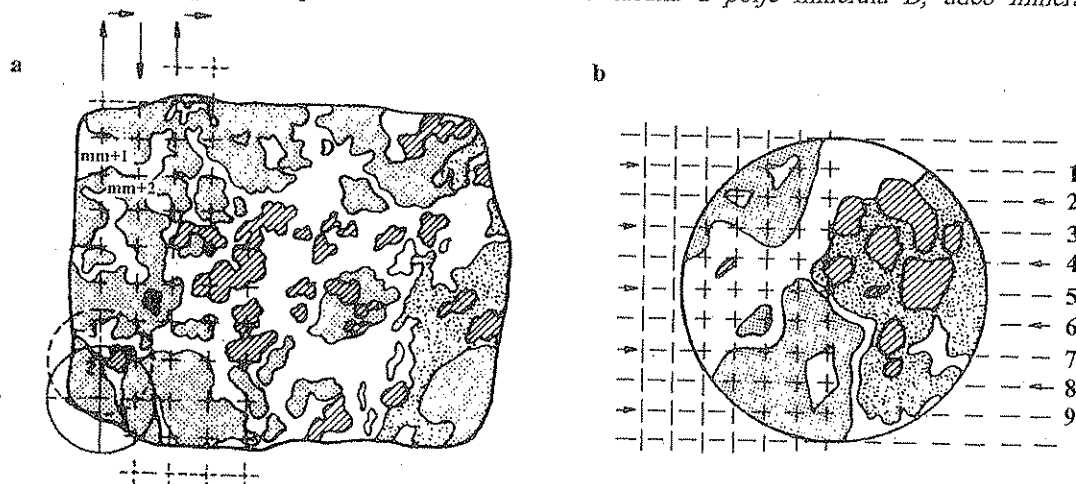
Chayes (1949.) je takođe razmatrao i preciznost metoda i izneo da brojač tačaka koji je on projektovao može da odredi relativnu zastupljenost nekog minerala, čak dva puta brže od bilo kog najefikasnijeg instrumenta a koji se koristi za *Rosival-Shand* metod. *Chayes* (1956.) je takođe utvrdio određene relacije između gustine postavljene mreže tačaka i ispitivanih površina. Zbog *Chayes*-ovog praktičnog i teoretskog doprinosa u popularizaciji brojača tačaka, procedura je s pravom dobila ime *Glagolev-Chayes*-ov metod.



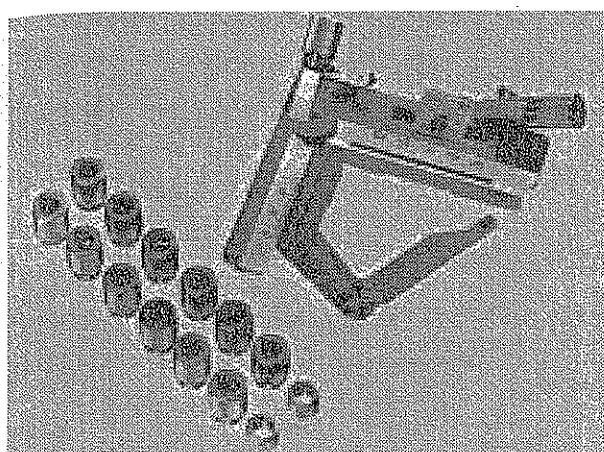
Sl.4.39 Ilustracija načina merenja i registrovanja linearnih odsečaka duž profilske linije snimanja. Legenda: l^A_{sl} - dužina odsečka preko minerala A, slobodno zrno; l^A_{sr} - isto, ali preko sraslog zrna.



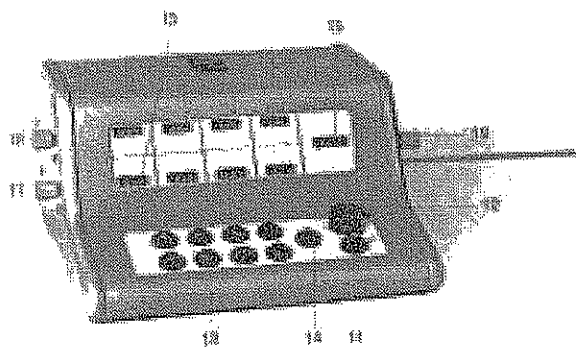
Sl.4.40 Merenja se više registracijom broja tačaka, koje padaju u presek končanica okulara (a.) na površini određenog minerala (b.) po određenoj mreži na poliranoj površini mikroskopskog preparata (c.) gde u vidnom polju 9 tačaka pada na površinu preseka minerala A a 27 tačaka u polje minerala B, udeo minerala $A=9/27=0,33$.



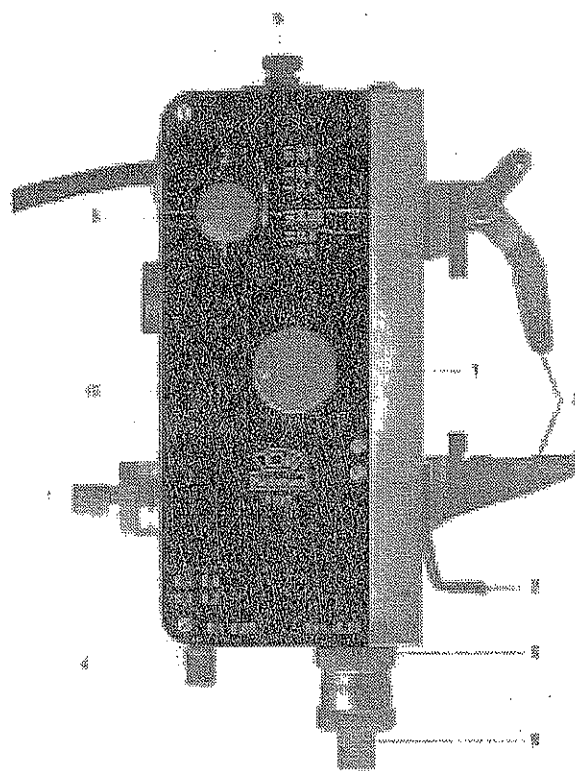
Sl.4.41 Ilustracija načina merenja i registrovanja broja tačaka duž profilske linije snimanja (briketiranog rudnog preparata - fragmentirane sirovine ili preparata matične stene).



a.



c.



b.

Sl. 4.42 Tačkasti integratori. Slika a: Stočić brojač tačaka (E. Leitz, Inc.). Slika b: Mehanizam tačkastog integratora tipa ELTINOR firme ROW-Rathenow (koji se postavlja i fiksira na stočić mikroskopa). Slika c: izgled dela uređaja za automatsku registraciju sa brojačima tačaka (Point counter). **Legenda.** Slika b: 1–telo mehanizma; 2–mehanizam za navijanje (dovođenje preparata na početak nove profilske linije); 3–držači predmetnog stakla – nosači preparata; 4–poluga zatezač opruge, regulator (izbor grupa: I – 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 i II – 0,1; 0,05); 5–mikrometrijski zavrtanj (jedninični korak 0,01); 6–prsten mikrometerskog zavrtanja; 7–zavrtanj za regulaciju rastojanja između profilskih linija; 8–preklopnik – regulacija dužine skoka između tačaka (izbor grupa: I – 0,05; 0,2; 0,3 i II – 0,1; 0,4; 0,6); 9–poluga izbora veličine skoka; 10–zavrtanja za pričvršćivanje mehanizma za stočić mikroskopa. Slika c: 11–glavni prekidač napona; 12–kontrolna sijalica; 13–mikroprekidači za 8 brojača–registratora; 14–prekidač za tačke u intergranularnom prostoru; 15–brojač tačaka (impulsa); 16–brojač tačaka–sumarni prikaz svih osmatranja; 17–zavrtanj za dovođenje na nultu poziciju svih brojača–gornji red; 18–zavrtanj za dovođenje na nultu poziciju svih brojača – donji red; 19–zavrtanj za dovođenje u nultu poziciju sumarnog brojača.

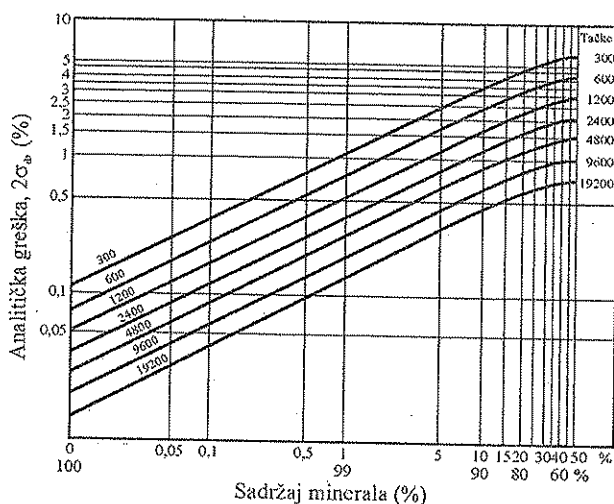
4.6.5 TAČNOST ANALIZA SIROVINE I PROIZVODA PMS UZ POMOĆ RUDNOG MIKROSKOPA

Tačnost analiza ove vrste je teško oceniti. Postoji više izvora grešaka, s napomenom da je najozbiljnija – greška uzimanja uzoraka tj. reprezentativnost uzoraka. Samo pažljiv rad sa mikroskopom ne može kompenzirati greške vezane za grešku prikupljanja uzoraka, i ovo se mora imati u vidu jer se dobijeni podaci uvek odnose na relativno veću rudnu masu a ponekad i na celo rudno telo. Sa druge strane imamo greške vezane za ravnomernost orudnjenja odnosno ujednačenost sadržaja korisnih komponenti. Kako se ove greške mogu znatno umanjiti time što će se povećati sam reprezentativni uzorak za izradu specimena odnosno povećać se ukupan broj zrna koja će se meriti. To se postiže tako što će se povećati površina na kojoj se vrši analiza odnosno tako što će se analizirati jedan, dva ili više rudnih preparata. Prema tome postavlja se pitanje koliki broj rudnih preparata treba pripremiti da bi rezultati bili što reprezentativniji i imali veću reproduktivnost. Osnovni zadatak je da kod

kvalitativnog ispitivanja ruda ili proizvoda koncentracije analitička greška bude manja od neke date vrednosti. Izučavanja su pokazala da analitička greška nije toliko posledica stepena neujednačenosti u sastavu uzoraka, već i posledica krupnoće zrna koja se analiziraju. (Preporučuje se, posebno za proizvode koncentracije – koncentrat, međuproizvod, jalovina, da budu usko klasirani i da svaka klasa bude pojedinačno analizirana). Znači da površina za krupnozrnu sirovinu (najkrupniju klasu) mora biti mnogo veća nego površina za analiziranje za sitnozrnu sirovinu odnosno sitnije klase krupnoće. Postoji dijagram koji pokazuje odnos tačnosti analize za određenu krupnoću zrna i veličinu površine preseka rudnog preparata. Veličina zrna sirovine se izražava uz pomoć pojma o broju IC (Identity Change) koji određuje broj promena jedne mineralne vrste u drugu duž profilske linije presecanja zadate dužine (standardna greška 1,41 %). Za dati broj IC i određenu površinu (u mm²) iz tabele se dobija broj potrebnih rudnih preparata za mineralošku analizu. Podrazumeva se da su paralelni preseki – profilska linija snimanja, udaljeni jedan od drugog 1 mm.

IC	Izmerena površina, mm ²				
	960	625	480	320	160
90	1				
80		2	2	2	
70	2				3
60			3	3	4
55		3		4	5
50	3		4	5	6
45		4	5	6	7
40			6	7	8
35	4	5	6	7	9
30		6	7	8	
25	5	7	8	9	
	6	8	9		
		9	10		
	7	10			
20					
	8				
15	9	>13	>17	>23	

Sl.4.43 Dijagram za određivanje broja preparata prema broju IC, zavisno od površine standardnih preparata, pri istoj analitičkoj grešci (standardne devijacije) <1,41. (Skala IC sa leve strane; slede kolone koje pokazuju broj mikroskopskih preparata (zavisno od njihove površine preseka) koje treba pripremiti od jednog uzorka, kako bi srednja analitička greška pri mineraloškoj analizi bila manja od 1,41.)



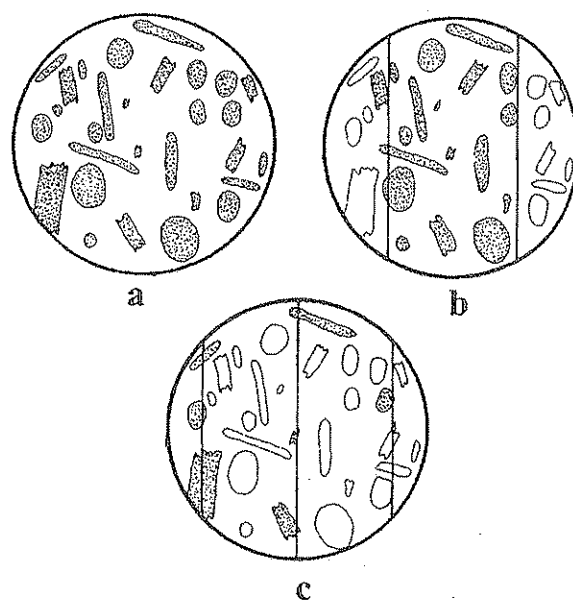
Sl.4.44 Dijagram zavisnosti veličine analitičke greške (2σ) od broja tačaka osmatranja (Po A.R. Baringeru)

Tačnost analize u funkciji broja ispitivanih tačaka ili zrna zavisi i od procentualnog sadržaja svakog prisutnog minerala. Tako možemo očekivati da će relativna greška iznositi $\pm 10\%$ ukoliko je sadržaj korisne kompo-

nente u rasponu 1,0% – 0,1%; $\pm 20\%$ ukoliko je sadržaj korisne komponente u rasponu od 0,1% do 0,05%, $\pm 100\%$ ukoliko je sadržaj ispod 0,05%, kakav je na primer sadržaj zlata u nekoj rudi.

4.6.6 FLEET-OV METOD

Metod snimanja za kvantitativno određivanje relativne zastupljenosti raznovrsnih minerala u briketiranim rudnim preparatima ponudio je i Fleet (1926.). Do tada je zastupljenost minerala, u briketiranim rudnim preparatima ili proizvodima PMS na sahatnom staklu, procenjena vizuelno i jedino semikvantitativno. Fleet (1926.) je radeći sa mineralima teške frakcije, pripremio mikroskopski preparat i sproveo determinaciju i brojanje svih zrna na način kao na Sl. 4.45 a, b i c.



Sl.4.45 Metode snimanja stereobinokularnim mikroskopom: a. Fleet-ov metod; b. Van der Plas-ov metod traka; c. Galehouse-ov linijski metod.

Rezultati ovakve kvantitativne mineraloške analize, odnosno, ovoga metoda su procentni brojevi (broj procenata) koji inače ne mogu biti transformisani u površinske, zapreminske ili masene procenite bez nekih dodatnih podataka. Ovo je zbog toga što su zrna različite krupnoće a njihovo snimanje, brojanje ne podrazumeva ništa u pogledu relativne krupnoće, različitih mineralnih vrsta ili promene u krupnoći određene mineralne vrste.

Zbog toga relativni brojčani podaci o različitim mineralnim vrstama ne mogu se prihvatiti da predstavljaju realne površine odnosno volumene tih različitih minerala.

Jedini način prevođenja procentnih brojeva u procentne površine je merenje veličine pojedinih zrna ili briketiranje u rudne preparate i snimanje zrna potpuno iste krupnoće - monodisperzna zrna. Čak i tad procentne površine određene preko snimljenih prebrojanih zrna direktno ne podrazumevaju i zapreminske procenite. Različiti morfološki oblici kristala ili forme nastale cepljivošću datih minerala to ne dozvoljavaju. Ukoliko je cilj ispitivanja kvantitativna mineraloška analiza, obično nije potrebno ni pokušavati pretvarati brojčane procenite u površinske, zapreminske ili masene procenite. Brojčani

procenti (prema broju zrna) su se već sami za sebe pokazali kao vrlo korisni parametri.

Pri korišćenju *Fleet*-ovog metoda snimanja kao i drugih srodnih metoda javljaju se izvesne zajedničke poteškoće:

- Identifikacija zrna (čestica) u briketiranim rudnim, petrogenim preparatima kao i zrna na sahatnom staklu je kudikamo teža nego identifikacija istih minerala u nerazrušenim stenama ili rudi.

- Kvalitet pripremljenih preparata (finoća poliranja) takođe daju različite efekte i otežavaju identifikaciju.

- K tome, preporučuje se da krupnoća zrna za pripremu preparata, ne budu krupnija od 0,5 mm u prečniku.

- Deo uzorka uvek treba sačuvati za eventualne druge načine identifikacije minerala (P-T analiza, hemijska analiza, rendgen itd.) ukoliko ne budu mogli biti identifikovani u mikroskopskom preparatu.

- Kod pripreme preparata, treba imati u vidu da je čest slučaj da zrna minerala teže da ostanu u ravni sečenja i poliranja upravo svojom najdužom osom ili baznom preseku kao najstabilnijim površinama: tako na poliranoj površini preseka dobijamo češće prtkaste, štipčaste izdužene preseke ili bazne preseke kod minerala sa izraženom baznom cepljivošću.

Mada se *Fleet*-ov metod ne primenjuje široko, međutim on ima i izvesne prednosti jer pružajući brojčane procenite omogućuje da se oni dalje mogu statistički obrađivati.

❖ ❖ ❖

❖ **Primer:** analiza uzorka peska, stereobinokularnim mikroskopom, i postupak utvrđivanja zastupljenosti prisutnih minerala na osnovu ukupne količine zrna u uzorku. Za slične primere, je svakako vrlo korisno ako se sirovina predhodno usko klasira i na svakoj klasi izvrši frakcionisanje i pristupi kvalitativno-kuantitativnoj analizi. Poznavanjem srednje vrednosti krupnoće zrna u jednoj klasi krupnoće, odnosno prosečnog poluprečnika, moguće je izračunati zapreminu a zatim i masu zrna (Tablica 4.34).

Srednja zapremina zrna u uzorku

$$V_{SR} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

Maseni udeo datog minerala u jednoj klasi krupnoće uzorka sirovine, sa srednjom zapreminom zrna, poznatom gustinom minerala i količinom (brojem) zrna iznosi

$$M_{SR} = V_{SR} \cdot \rho \cdot N_{ZR}$$

Maseni udeo Q datog minerala u uzorku

$$Q = \frac{m_{SR}}{M} \cdot 100 = \frac{\left[\left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \right) \cdot N_{ZR} \cdot \rho \right] \cdot 100}{M}$$

gde su:

m_{SR} – masa minerala u klasi;

M – maseni udeo date klase krupnoće u uzorku.

Maseni udeo teške frakcije (predkoncentrat), izdvojen P-T analizom iz rudonosnih peskova, iznosi 59,90% odnosno jalovine 40,10 %. Srednja vrednost gustine sirovine, izračunate preko količine zrna, iznosi oko 4,55 g/cm³. Interesantno je ovde napomenuti, a što treba uvek u izveštaju naglasiti, da li se zastupljenost minerala izražava preko broja zrna ili zapremine odnosno uvođenjem gustine minerala preko masenog udela. Iz primera se jasno vidi da su te razlike značajne.

4.6.7 VAN DER PLAS-OV METOD TRAKA

Van der Plas-ov (1962,1965.) metod traka ili *Ribbon metod* je postupak kvantitativnih mineraloških snimanja sličan *Fleet*-ovoj metodi s tom razlikom da se u ovom postupku ne broje odnosno snimaju sva zrna (čestice) u vidnom polju, već samo ona koja se nalaze u, dvema linijama, ograničenoj zoni. Određena širina vidnog polja u kontinuitetu snimanja predstavlja jednu traku, pojas ili šlajfnu na površini preparata duž koje i na kojoj se vrši snimanje. Sl.4.45 b.

Metod traka, pojasa je detaljno opisao *Van der Plas* (1962.) i preporučio ga, prvo, za postupke granulometrijske analize na mikroskopskim preparatima a zatim i kao postupak koji može biti korišćen pri kvantitativnoj mineraloškoj analizi briketiranih rudnih preparata proizvoda PMS. U ovom postupku snimaju se i registruju samo one individue (zrna, čestice) koje su unutar granica određenog pojasa ili trake. U stvari, preparat se pamera na mikroskopskom stočiću i sve individue koje se nađu u vidnom polju ograničenom dvema linijama rubovima pojasa, se identifikuju i registruju.

Tablica 4.34 Zastupljenost minerala u uzorku

Minerali	Broj zrna N_n	Zastupljenost minerala, % (u teškoj frakciji=59,90%)	Gustina minerala	$N_n \times \rho$	Maseni udeo minerala u odnosu na tešku frakciju, %	Maseni udeo minerala u odnosu na ukupnu rudu, %
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Ilmenit	762	46,52	4,80	3658	49,13	29,43
Leukoksen	330	20,15	4,72	1558	20,92	12,53
Menakanit	14	0,85	5,00	70	0,94	0,56
Rutil	160	9,77	4,50	668	8,97	5,37
Rutil+kvarc	8	0,49	3,50	28	0,38	0,23
Cirkon	184	11,23	4,68	862	11,58	6,94
Monacit	14	0,85	5,10	72	0,97	0,58
Silikati	140	8,55	3,00	420	5,64	3,38
Ostali	14	0,85	4,00	56	0,75	0,45
Izlomljena zrna	12	0,73	~ 4,50	54	0,72	0,43
Suma:	1638	100,00	—	7446	100,00	59,90

Van der Plas-ov metod traka je u suštini vrlo sličan planimetrijskom metodu s tom razlikom što se u planimetrijskom metodu snimanje vrši kvadratnim ili pravougaonim površinama (okularnim mrežicama) postavljanim diskontinualno na ekvidistantnim rastojanjima duž linije profilisanja, a metod traka podrazumeva neprekidno snimanje širinom pojasa ili trake u vidnom polju ograničenog dvema linijama.

Kako kod pripreme rudnih preparata nije uvek moguće dobiti idealan razmeštaj i položaj preseka zrna (ili čestica) na poliranoj površini, treba obratiti posebnu pažnju da pojasevi odnosno trake snimanja budu postavljeni sistematski ili na slučaj ali tako da što bolje reprezentuju celokupnu površinu preparata. Postupak će dati zadovoljavajuće rezultate jedino ukoliko je širina pojasa snimanja, u vidnom polju, kao i veličina analizirane površine, dovoljno velika, a višestruko veća od najkrupnijih zrna (čestica). Jedna od mana postupka, kao i kod nekih drugih metoda, jeste da mnoga zrna koja bi trebala biti registrovana, se neće pojaviti u vidnom polju odnosno pojasu snimanja, čime će i izostati njihova identifikacija i registrovanje.

4.6.8 GALEHOUSE-OV LINIJSKI METOD

Danas najrasprostranjeniju metodu u upotrebi za kvantitativnu mineralošku analizu briketiranih rudnih ili drugih preparata, a posebno pogodna za proizvode u PMS, predložio je Galehouse (1969.) kao brzu linijsku metodu neprekidnog dejstva. Metod dozvoljava snimanje i registrovanje na uzorcima sa brojnim i raznovrsnim i mineralnim česticama u preparatu. Postupak se izvodi tako što se registruje svako pojedinačno zrno u tački susreta tj. preseka končanice i datog minerala duž linija profilisanja postavljenih na ekvidistantnim rastojanjima na površini rudnog preparata. Sl.4.45 c.

Činjenica da je skoro nemoguće pripremiti rudni preparat sa potpuno slučajnim razmeštajem zrna na njegovoj površini, neophodno je postaviti pravce profilskih linija na takvu gustinu da budu čak više njih (minimum tri) unutar vidnog polja. Rezultat snimanja ovim metodom je brojčana, numerička učestalost, koja jednostavno pokazuje koliko je često zadata mineralna vrsta bila

presečena tokom brojanja. Brojčana učestalost je povezana sa, ali očigledno različita od njih, površinskim, zapreminskim, masenim ili čak brojčanim procentima. Treba imati u vidu i izvesnu predisponiranost, ovoga metoda, a samim tim veću verovatnoću događaja da u uzorku budu uvek pre registrovana krupna zrna u odnosu na ona sitna, tokom analiziranja. Tako se sa rastom površina pojedinačnih zrna, povećava i šansa da budu registrovana, prema tome njihova različita krupnoća onemogućuje da brojčana učestalost bude takođe izražena i kao procentna površina. Numerička učestalost daje manje realne vrednosti pri snimanju krupnih zrna a povećava rezultate proračuna (zastupljenosti) kod preseka sitnih zrna, prema tome brojčana učestalost ne podrazumeva zapreminske procenat a isto tako ne može biti prevedena ni u masene procenat ili pak, preko hemijske analize u racionalnu analizu. Nadalje, brojčana učestalost se razlikuje od brojčanih procenata (Galehouse, 1969.). Brojčana učestalost je po apsolutnoj vrednosti veća od brojčanih procenata za krupnija zrna a manja od brojčanih procenata za sitnija zrna. Na žalost, većina istraživača koji primenjuju Galehouse-ov linijski metod snimanja rudnih preparata, pravi grešku, iskazujući svoje rezultate kao da su brojčani procenti umesto brojčana učestalost. Potencijalna opasnost kod ovakvih slučajeva je u činjenici da brojčana učestalost ne može biti tretirana statistički na isti način kao što je slučaj sa brojčanim procentima ili površinskim procentima. Ova razlika disproporcija između brojčane učestalosti, brojčanih procenata i procentnih površina može biti minimizirana snimanjem zrna odnosno čestica vrlo usko klasiranih - monodisperznih čestica.

Numerička učestalost, kao broj slučajeva registracije pojedinačnih zrna datog minerala, jednaka je brojčanim procentima jedino: ♦ kad su sva zrna odnosno preseki na preparatu brojana, kao u Fleet-ovom metodu; ♦ kad su svi preseki zrna brojani, u odgovarajućim segmentima, kao u Van der Plas-ovom postupku visoke gustine profilisanja ili ♦ kad su svi preseki zrna odnosno čestica jednakih površina na poliranim površinama preparata; ♦ brojčana učestalost i brojčani procenti su identični procentima površina jedino ako sva zrna imaju istu površinu preseka.

4.7 PRIPREMA PREPARATA ZA RUDNU MIKROSKOPIJU

4.7.1 UVOD

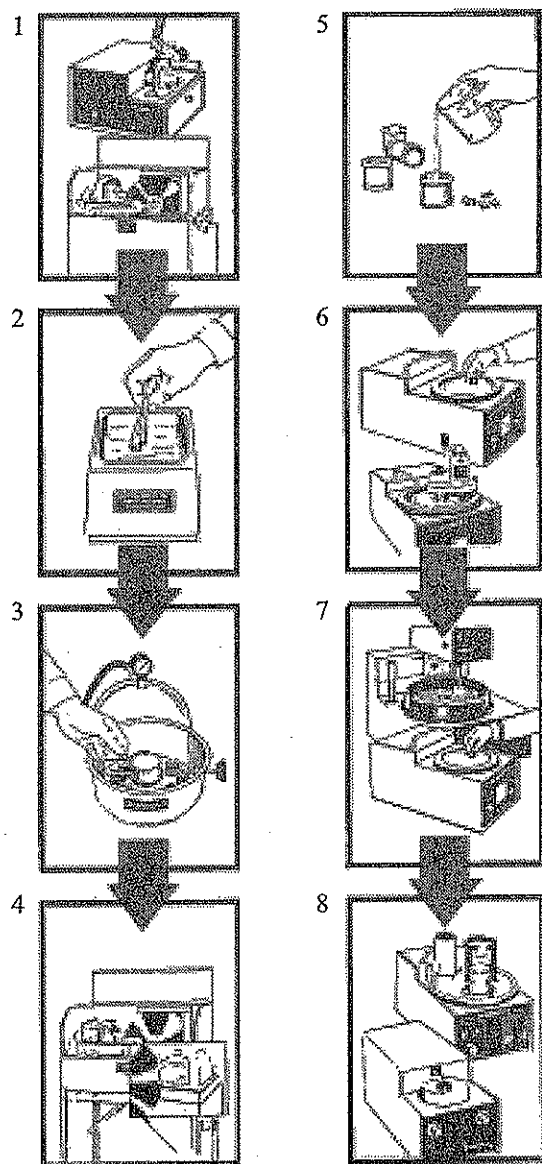
Ispitivanja mineralnih sirovina rudnim polarizacionim mikroskopom ili drugim mikroskopskim metodama zahtevaju i određenu pripremu uzoraka - mikroskopskih specimena ili rudnih poliranih preparata. Ovakva priprema podrazumeva, pored odabira reprezentativnih mineraloških uzoraka, i određivanje pogodnog mesta sečenja pomenutih komada rude. Mesta odnosno ravni sečenja moraju biti tako odabrane da se na preseku može odrediti što veći broj minerala, prisutnih u rudi, kao i da se mogu uočiti strukturni odnosi tih minerala. Prema tome sama priprema podrazumeva, pored rečenog, kao prvo sečenje, zatim grubo oblikovanje preparata, impregnacija i eventualno zalivanje ili presovanje smolama, grubo

brušenje, fino brušenje, grubo poliranje i nekoliko faza finog, definitivnog poliranja (Sl.4.46). Urađeni rudni preparati se mogu, njihova polirana površina, zaštititi odnosno konzervirati kako bi preparat mogao biti odložen za kasniju upotrebu. Razmotrićemo samo neke od osnovnih stadijuma pripreme rudnih preparata.

4.7.2 SEČENJE UZORAKA

Za specijalna sečenja tvrdih materijala, kakve su neke stene ili rude, keramika i karbidi preporučuju se rezne ploče čije su široke obodne rezne površine od poliesterskih smola (ili neke legure metala - mesinga) impregnirane česticama dijamanta ili su im samo rubovi (po obodnom delu) "uvaljani" u dijamantski prah (poput inja). Rezne ploče, različitog prečnika, mogu biti sa ve-

ćom ili manjom količinom, ugrađenih dijamantskih čestica (bilo impregnacije ili samo kao jedan čvrsti monosloj od uvaljanog praha). Rezne ploče sa manjom koncentracijom dijamantskih čestica koriste se za sečenje materijala ekstremne glatkoće (staklo, keramika), dok sečiva sa visokom koncentracijom abrazivnih čestica, nalaze primenu, i na osnovu iskustva se smatraju najuniverzalnijim pri sečenju ruda metalnih minerala i materijala od metala. Za najpreciznija sečenja, ili uzorke lošeg kvaliteta odnosno uzorke gde je neophodno imati što manje gubitaka, prepuručuju se rezne ploče najmanjeg prečnika (7,60 cm) i vrlo male debljine (0,15 mm).



Sl.4.46 Ilustracija pripreme rudnih preparata po stadijima: 1-sečenje komada rude, 2-čišćenje u ultrazvučnoj kadici, 3-vakumiranje, impregnacija, 4-doterivanje i obrada, 5-zalivanje ili presovanje, 6-fino brušenje, 7-grubo poliranje, 8-zvršno poliranje.

Rezne ploče (šajbne za sečenje). Abraziono sečenje je najrasprostranjeniji metod uzorkovanja stenskog materijala za mikroskopska ispitivanja. Kvalitetno abraziono sečenje podrazumeva sečenje bez paljenja, deformacija i bez narušavanja strukture materijala koji se seče.

Da bi se sprovedo takvo abraziono sečenje važno je odabrati odgovarajuće abrazione rezne ploče (šajbne) za različite specifične materijale kao i da se obezbedi i postigne adekvatno hlađenje specimena tokom propisnog postupka sečenja. Šajbne za abraziona sečenja mogu biti:

- Šajbne od plastičnih masa ili veziva od gume sa aluminijum-oksidiom kao abrazivom.
- Šajbne sa oblandom (oblogom) od dijamantskih čestica.

Svetski priznati proizvođači ovog materijala, vrše pažljivu selekciju i sprovode obiman program istraživanja, testiranja da bi zadovoljili široke i raznovrsne potrebe ispitivanja materijala, naučnika, inženjera i specijalista različitih disciplina. Osnovne karakteristike reznih ploča svode se na sledeće: tip abrazivnih čestica, njihova krupnoća i čvrstina rezne ploče. Tako se silicijum karbid najčešće koristi kod nemetalnih minerala ili materijala dok je aluminijum oksid najbolji za metalne minerale i metale posebno gvožđa. Krupnozrnije rezne ploče seku krupnije komade brže i bez pregrevavanja, dok sitnozrnije rezne ploče prilikom sečenja daju finije površine preseka i malo se zagrevaju. Tvrde rezne ploče se lome sporije, sporije se habaju i traju duže a preporučuju se za mekše materijale. Meke rezne ploče brže se lome a preporučuju se za tvrde materijale. Za metalografska i rudnomikroskopska ispitivanja gde se zahtevaju minimalna oštećenja i minimalna neporemećenost strukturno-teksturnih odnosa proizvode se razne ploče sa abrazivom aluminijum oksidom vezanim smolom odnosno gumom. Ovakve rezne ploče odgovaraju zahtevima kao što su: otpornost ploče na habanje, brzina sečenja, oštećenost površina a da se pri tome dobiju što bolji preseki na najekonomičniji način.

Adekvatno i ravnomerno hlađenje specimena je preduslov kvalitetnom abrazionom sečenju bez termičkog oštećenja specimena. Za uređaje firme BUEHLER i firme ISOMET se za sečenja pomenutim šajbnama preporučuju specijalni fluidi i ulja. Sredstva za hlađenje istovremeno služe i kao mazivo odnosno vrše spiranje erodovanog materijala tokom sečenja. Osim dobrog izbora kvalitetnih reznih ploča i pravilnog hlađenja, najvažnija je, svakako, sama tehnika sečenja. Specimen mora biti čvrsto i stabilno, uvek pod istim uslovima, fiksiran, da bi se izbegli nepotrebni lomovi reznih ploča ili ošteti specimen. Pritisak tokom sečenja treba razumno odabrati i prilagoditi ga prema vrsti materijala koji se seče. Pregled najčešćih problema koji nastaju u toku abrazivnog sečenja stenskog materijala i moguće greške koje su do toga dovele, sa predlogom njihovog otklanjanja prikazani su u tablici 4.45.

Fluidi za sečenje. Neki proizvođači (Buehler Ltd.) preporučuju skoro za sva sečenja, a posebno za sečenja pri malim brzinama, dijamantskim reznim pločama, specijalne tečnosti lubrikante (np. ISOCUT). Ove tečnosti, osim efekta hlađenja, smanjuju vreme sečenja i daju izvanredno kvalitetne rezove, jer efikasno mazivo omogućuje česticama dijamanta da seku čisto bez stvaranja opiljaka a opterećenje sečiva je minimalno. Pored tečnosti kao što je destilovana voda, koriste se i specijalna rastvorljiva ulja, koja ne stvaraju penu niti izazivaju koroziju, posebno za uređaje sa povratnim sistemom za hlađenje.

Tablica 4.45 Zastoji i njihovo odklanjanje kod abrazionog sečenja

Problem	Kako se manifestuje Mogući uzrok	Postupak otklanjanja zastoja
1. Ploča "gori" (plavo obojenje)	• Pregorevanje uzorka	• povećati protok tečnosti za hlađenje, • smanjiti pritisak sečenja na uzorak, • upotrebiti mekšu reznú ploču.
2. Brzo habanje	• Rubovi rezne ploče se učestalo odlamaju	• odabrati tvrđu ploču, • smanjiti pritisak rezanja na uzorak.
3. Učestali lomovi reznih ploča	• nepravilan razmeštaj hlađenja • popuštanje nedovoljno fiksiranog uzorka	• postaviti pravilniji postupak hlađenja, • dobro fiksirati uzorak,
4. Otpor sečenju	• sporo habanje ploče	• odabrati mekše ploče, • smanjiti dotok tečnosti za hlađenje, • seći promenljivim pritiskom.
5. Jake vibracije rezne ploče	• neadekvatan kapacitet sečenja	• koristiti uređaje za veće kapacitete, • smanjiti broj uzoraka

4.7.3 MAŠINE I UREĐAJI ZA SEČENJE I GRUBO BRUŠENJE

Danas postoji nekoliko značajnih, u svetu proizvođača opreme za mineralografsku pripremu preparata. U velike proizvođače mašina i uređaja za sečenje kao i odgovarajućeg materijala, koji se testiraju u najboljim svetskim laboratorijama, vredno je pomenuti:

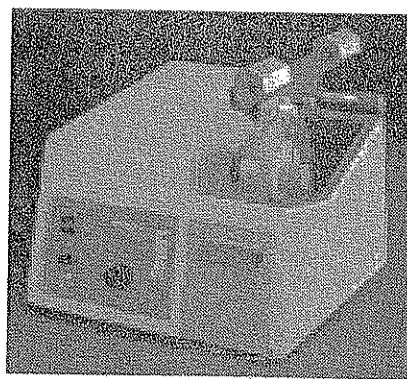
□ **AB BUEHLER** (AB BUEHLER Ltd., Apparatus for Microstructural Analysis, 2120 Greenwood st. / Evanston, Illinois, U.S.A. 60204), velika Američka kompanija koja proizvodi aparate i materijale za mikrostrukturne analize, nudi od mašina za sečenje tip Buehler CUTTER 10-1000 i tip Buehler CUTTER 1030, za veće serije sečenja, dok za manje laboratorije i precizna sečenja sa dijamantski reznim pločama (debljina reza 0,15 mm), nude Buehler ISOMET 11-1180 mašinu.

□ Za vrlo precizna i fina sečenja kao i obradu specimena Engleska kompanija **MALVERN** (MALVERN Instruments Ltd., Spring Lane South, Malvern, Worcestershire WR14 1AQ, England), nudi nekoliko tipova uređaja za mikrosečenja: MICROSLICE 1 sa perifernom reznom pločom; MICROSLICE 2 uređaj za mikrosečenja koji ima mogućnost za periferno i unutrašnje kolutno (prstenasto) sečenje (debljine do 0,05 mm). Uređaj ima mogućnost montaže kružnog goniometra. Za obimnije radove nudi se MICROSLICE 4A sa autoprogmatom. Uređaj poseduje dijamantske rezne diskove sa perifernom i kolutnom reznom površinom. Dubina reza i do 79 mm i potpunom automatskom kontrolom debljine rezanog materijala i broja takvih rezova sa brojačem rezova. Uređaj MICROSLICE 4M Manual Saw, sličan predhodnom po svojim tehničkim karakteristikama izuzev automatike koja ovde ustupa mesto ručnom podešavanju.

□ Čuvena Evropska firma **STRUERS** iz Danske (STRUERS, Valhojs Alle 176, D-2610 Rodovre, Denmark), nudi vrlo širok spektar uređaja i materijala za mineralografska ispitivanja. Od uređaja za sečenje nudi se MAGNUTOM automatska mašina sa mogućnošću programiranja, brzine sečenja rezne ploče, pritiska i ako je potrebno u toku rada njegovo smanjenje. Uređaj poseduje motor velike snage. Automatski uređaj za sečenje EXOTOM je konstruisan

za rad na krupnim i nepravilnim komadima. Uređaj ima dobar sistem hlađenja, veliku produktivnost a može da radi i bez uključivanja automatike ukoliko to materijal zahteva. Od laboratorijskih uređaja Struers nudi tipove Diskotom-2 univerzalni, sa mlaznicama za kontinuirano hlađenje, i dobrim tehničkim rešenjima kako bi lomovi rezne ploče i tenzija u uzorku bili svedeni na minimum. LABOTOM za manuelni rad sa lakim i brzim fiksiranjem uzorka, Accutom-2 univerzalna precizna mašina za sečenje manjih komada bilo kog oblika i velikim izborom različitih nosača uzorka. MINITOM mala mašina za precizna sečenja pri manjem broju obrtaja rezne ploče, i druge.

□ Stara nemačka firma **JEAN VIRTZ** iz Dusseldorfa (JEAN VIRTZ, Charlottenstr.73, Dusseldorf 1), skoro reaktivirana, u svom programu za pripremu uzoraka za mineralografska, metalografska i druga ispitivanja materijala nudi niz uređaja za sečenje sa širokim spektrom tehničkih rešenja. CUTO-10 univerzalna mašina za mokro sečenje svih vrsta materijala; CUTO-20 najviše korišćena mašina; CUTO-35 laboratorijski tip mašine za manje komade i precizan automatski ili manuelni rad; CUTO-75/75A najveća mašina u ovoj seriji i DIMA-10, 15 i 30 sa dijamantskim reznim pločama za precizna orijentisana sečenja laboratorijskih uzoraka ili briketiranih specimena.

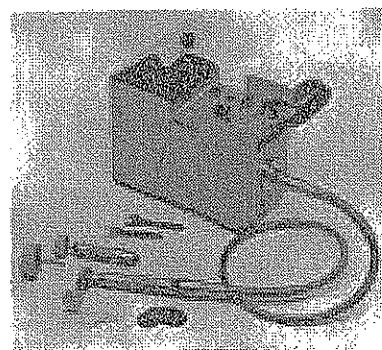
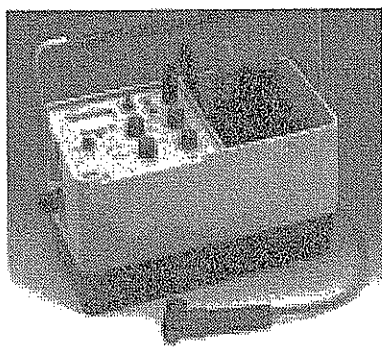


Sl.4.47 Mašina za sečenje sa dijamantskom reznom pločom.

4.7.4 BRUŠENJE - GRUBO I FINO

Za kvalitetnu mikrostrukturnu analizu, neophodno je grubo odsečene (isečene) specimene uzoraka ruda, stena, minerala, dalje obraditi, doterivanjem oblika preparata, smanjenjem veličine, odnosno uklanjanjem svih skrama, prevlaka i nečistoća kao i eliminisanje hrapavosti površine koja će se dalje obrađivati. U ovu svrhu služe abrazioni diskovi i abrazione trake različite granulacije.

Abrazioni diskovi šmirgl papira se lako montiraju na brzo rotirajuće nosače a otporni su za rad bilo suvim bilo mokrim postupkom. Abrazioni diskovi sa pravilnim razmeštajem čestica silicijum-karbida (čvrsto vezani za podlogu) omogućavaju maksimalnu efikasnost pri skidanju materijala sa minimalnim narušavanjem ili deformacijom uzoraka - specimena. Abrazioni diskovi (sa samolepivim šmirgl papirom) mogu biti sa sledećim granulacijama 60, 120, 180, 240, 320, 400, 600 meša.



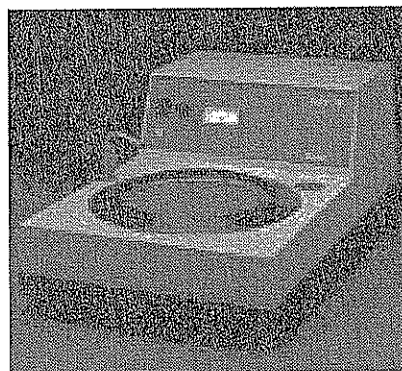
Sl.4.48 Prenosivi, terenski uređaji za sečenje, brušenje i poliranje rudnih preparata.

Abrazione beskonačne trake šmirgl papira koje se montiraju na odgovarajući tip mašina takođe omogućuju neprekidan i komforan rad grube obrade mineralografskih specimena. Abrazioni diskovi kao i abrazione trake proizvode se u različitim granulacijama, silicijum karbida ili aluminijum oksida otpornih na rad na suvo ili na mokro. Standardne granulacije su 50, 60, 80, 120, 150, 180, 240, 320, 400 i 600. Pri radu sa šmirglama preporučuju se i specijalna rastvorljiva ulja koja su tako formulisana da deluju antikorozijski i ne penušaju u toku rada.

FINO BRUŠENJE. U drugoj etapi brušenja se koriste rotacioni diskovi od livenog gvožđa (gus) na koje je moguće postaviti šmirgle različite finoće, odnosno gradacije abrazivnih materijala. Abrazivi mogu da se postavljaju kao suspenzija sa destilovanom vodom, kao sprej ili kao gotovi samolepivi diskovi na papiru odnosno teksti-

lu. Brušenja mogu da se rade i na uređajima sa beskonačnim trakama ili rolnama. Tu razlikujemo sledeće materijale i abrazive:

- Papirne trake i rolne sa silicijum-karbidnim abrazivom.
- Tabaci šmirgl papira sa aluminijum-oksidsnim abrazivom (gradacije 3; 2; 1; 0; 00; 000; 0000).
- Tabaci i rolne šmirgl papira sa silicijum-karbidnim abrazivom (gradacije 60, 120, 180, 240, 320, 400, 600).
- Abrazioni papirni diskovi (sa finoćama kao i tabaci i rolne).
- Silicijum-karbidni papirni diskovi za brušenje (gradacije 120, 180, 240, 320, 400, 600).
- Diskovi za brušenje sa dijamantskim česticama zalivenim poliesterskim smolama (gradacije od 300, 165, 70, 45, 30, 15, 9, 6 μ m).
- Diskovi za brušenje sa dijamantskim česticama vezanim metalom ili nekom legurom metala (gradacije 165, 70, 45, 30, 15 μ m).



Sl.4.49 Mašina za brušenje i poliranje sa rotirajućim diskom.

Abrazivni materijali. Materijali za sečenje, grubo ili fino brušenje mogu biti:

- Šmirgle (usitnjeni korund), silicijum-karbid, aluminijum-oksidi i bor-karbid mogu biti korišćeni kao abraziona sredstva, za grubo i fino brušenje, sa nešto krupnijim klasama, dok se za grubo poliranje koriste ovi materijali ali sitnije klase krupnoće.
- Šmirgla krupnoće 400 mesh-a, 800 mesh-a, 1200 i 3200 mesh-a.
- Aluminijum-oksidi (Al_2O_3) (glinica) sa sledećim krupnoćama (u μ m) 3; 5; 9,5; 12,5; 14,5; 17,5; 20,0; 22,5; 25,0.
- Silicijum-karbid (SiC) sa finoćama 120; 240; 320; 400; 600; 1000.
- Bor-karbid (B_4C) sa finoćama 180; 320; 400; 600; 800; 1000.

4.7.5 POLIRANJE - GRUBO I FINO

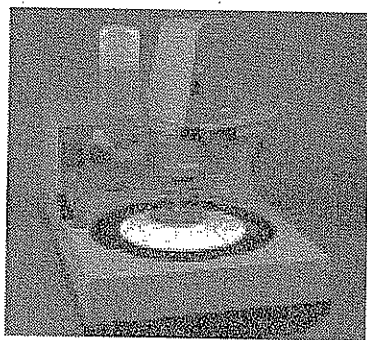
Materijali za grubo i definitivno poliranje (fini praškovi). Nakon brušenja mikroskopskih preparata, kada je gornja površina već relativno ravna, pristupa se, svako posle pranja i čišćenja u ultrazvučnoj kadici kako bi se odstranila sva zrna abraziva, poliranju uzoraka. Poliranje ima dva stadijuma grubo i definitivno, a može da se vrši ručno ili mašinski. Pri ovim operacijama se kori-

ste različiti abrazivi, zavisno od materijala koji se poliraju (tvrđi, mekši), kao id toga koja je etapa rada u pitanju. Najčešće korišćeni materijali su sledeći:

- ♦ Aluminijum-oksidi (Al_2O_3) krupnoće 0,05 μm za γ -mikropoliranje; od 0,3 μm za α -mikropoliranje; zatim od 1,0 μm i od 15 μm za mikropoliranje; glinica za poliranje No.1 od 5,0 μm ; glinica No.2 od 0,3 μm ; glinica No.3 od 0,03 μm .
- ♦ Cerijum-oksidi (CeO) od 1,0 μm .
- ♦ Hrom-oksidi (Cr_2O_3) krupnoća 15,0; 1,0; 0,5 μm .
- ♦ Gvožđev-oksidi (Fe_2O_3) "juvelirsko crveno", od 3,0 μm .
- ♦ Magnezijum-oksidi (MgO).
- ♦ Kalaj-oksidi (SnO_2).
- ♦ Industrijski dijamanti širokog raspona krupnoće.

Abrazivi se koriste kao klasirane praškaste materije ili kao suspenzije u destilovanoj vodi osim dijamantskih abraziva koji se koriste u obliku pasta ili u obliku aerosol sprejeva. Dijamantske paste, zavisno od granulometrijskog sastava mlevenih dijamanta markiraju se na određeni način, tako imamo: siva pasta sa krupnoćom čestica od 1/4 μm , plava od 1 μm , zelena od 3 μm , žuta od 6 μm , crvena od 9 μm , braon od 15 μm , mahagoni 30 μm , purpurna od 45 μm .

Platna za poliranje. Pri poliranju uzoraka, ručno ili mašinski, koriste se različite vrste platna od prirodnih materijala ili od novijih veštačkih vlakana. Najčešće korišćeni materijal je svakako *bilijarska čoja* različitih proizvođača. Zatim je tu i *kanvas platno*, *vuneni filc*, *svila*, materijali tipa *pliša* ili *velura*, najlona i drugi.



Sl.4.50 Mašina za poliranje automatska.

4.7.6 IMPREGNACIJA, ZALIVANJE, PRESOVANJE I BRIKETIRANJE

Često puta su materijali od kojih se seku komadi - specimeni, za rudno mikroskopska ispitivanja, u vrlo lošem stanju (alteracija stena, kataklazirani materijal, oksidacija, mala čvrstina materijala, slabo vezan materijal i dr.) te ih je pre početka samog grubog odnosno finog poliranja neophodno dovesti u jedno stabilno, čvrsto stanje gde bi se očuvali strukturno - teksturne karakteristike i međusobno odnosi konstituenata. Ovakvi postupci podrazumevaju, da se isečeni i grubo obrađeni reprezentativni specimeni, nakon sušenja i vakumisanja, prvo, impregnišu nekim organskim vezivom, drugo zaliju organskim (poliesterskim, akrilnim) smolama ili kao treće upresuju (termički) u kalup sa organskim materijalima (bakelit, pleksiglas) odnosno briketiraju na isti način

ako je materijal za izradu preparata sitno fragmentirana sirovina. Još se i danas (kod starih majstora preparatora) može naići na postupak impregnacije "kuvanjem" u rastvoru šerlaha, terpentina i drugim organskim dodacima, čime se postiže izvanredna kompaktnost specimena za dalju obradu i korišćenje. No, postupci impregnacije i kalupljenja rudnih preparata poštanskim voskom ili zalivanjem metalima koji imaju nisku tačku topljenja je davno potisnuto novim savremenim materijalima. Savremeni laboratorijski postupci podrazumevaju impregniranje i kalupljenje odnosno briketiranje materijala za rudne preparate tzv. hladni postupak zalivanja epoksidnim smolama i drugi termički postupak kompresionog kalupljenja (sa varijantom termičkog livenja i termoplastičnog livenja).

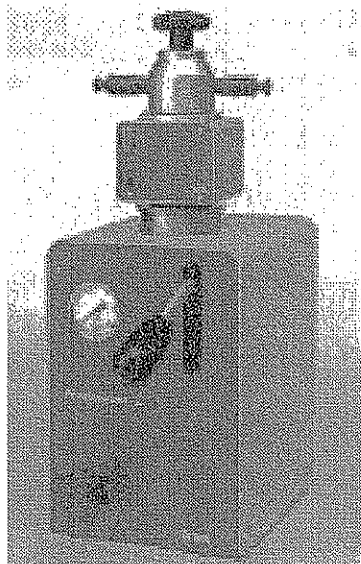
■ **HLADNI POSTUPAK ZALIVANJA EPOKSIDNIM SMOLAMA.** Hladni postupci zalivanja, kalupljenja materijala za rudne preparate podrazumevaju zalivanje, u određenim kalupima, komada ili fragmenata rude različitim epoksidnim smolama. Postupak je vrlo jednostavan, brz i ne zahteva nikakve specijalne uređaje. Od organskih smola se zahteva da dobro prijanjaju na površinu rude, da imaju odgovarajući i stalan viskozitet kako bi doprle do svih pora i pukotina i ispunile ih, kao i da brzo očvršćavaju. Providnost ili slabo mlečno bela zamućenost je različita za različite vrste smola. Osnovne komponente, kod zalivanja i kalupljenja materijala za rudne preparate smolama su, poliesterska smola, ubrzivač i očvršćivač čijim se mešanjem u tačno određenim proporcijama dobija smeša koja vrlo brzo očvršćava. Različiti, svetski poznati, proizvođači nude pod raznim imenima uglavnom tri tipa organskim materijala: epoksidne smole, akrilne i poliesterske smole. Epoksidne smole se očvršćavaju do pola sata (a potpuno očvrstnu 2-8 časova) providne su, dobro prijanjaju, najpogodnije su za mineraloška - rudnomikroskopska ispitivanja, metalurška i ispitivanja keramike.

Kompanija STRUERS iz Danske u svojoj HQ-seriji proizvodnog programa nudi: CITOFIX, providnu akrilnu smolu sa malim viskozitetom i neznatnom kontrakcijom pri očvršćavanju; EPOFIX, epoksidna smola pogodna za "zalivanje" poroznih i ispućalih specimena složenih oblika; TRIOFIX, akrilna smola za vrlo čvrsto, tvrdo zalivanje ali bez pojave kontrakcionih pukotina ili sličnih deformacija skupljanja pri očvršćavanju. Druga SQ-serija proizvoda, iste kompanije, namenjena za brze i rutinske poslove impregnisanja, briketiranja odnosno zalivanja, nosi nazive: ACRYFIX je akrilna smola za brza rutinska kalupljenja. DUROFIX je smola sa neznatnim skupljanjem. SERIFIX je vrlo jeftina poliesterska smola za uzorke jednostavnijih oblika. Smole ove serije uglavnom se koriste za rutinsko i brzo kalupljenje.

Firma Jean-Wirtz iz Nemačke za takozvani hladni postupak zalivanja odnosno briketiranja materijala, nudi proizvode pod nazivima: Techovit 4000, 4004, 4071; Plastic 1, smola za najtvrđa i najčvršća zalivanja preparata gde je neophodno očuvati i najfinije strukturne elemente; Varidur 6, 7, 8 smola idealna za ujednačavanje tvrđine minerala i veziva neophodnih za dalju obradu specimena; Plastic 900 za specijalna elektro provodne briketirane specimene; Wirtz akemi poliester potpuno providan; Epoplast nova epoksidna smola i drgi. Naravno uz sve to nude se i kalupi različitih veličina od silikonske gume, graduisane čaše, mešalice i ostali pribor.

Ista firma nudi za takozvani termo kompresioni ili topli postupak nekoliko komponenata. Termo-plastičnu providnu sintetičku smolu A, za rutinske poslove i sintetičku smolu F za specijalne namene. Zatim su tu i druge komponente za termoplastičnu obradu kao što su: bakelit, dialilftalat i Epovit (epoksidna smola) sa izvanrednim osobinama.

Firma Buehler iz SAD nudi EPO-KWICK EPOXY smolu i EPO-KWICK očvršćivač. Ova firma za pripremu uzoraka pored epoksidnih smola, koje su idealne za mineraloške uzorke i pokazuju najmanje skupljanje, nude i akrilne i poliesterske smole. Akrilne smole su providne, brže očvršćavaju i jednostavnije su za livenje. One imaju relativno visoku eksotermalnu temperaturu. Poliesterske smole su potpuno providne ili sa blagom ružičastom nijansom, ne lepe se na staklene i metalne kalupe, malo se skupljaju pri očvršćavanju ali pri znatno dužem vremenu.



Sl.4.51 Presa za izradu rudnih preparata – presovanjem.

Livenje ili zalivanje specimena se vrši u trajno elastičnim sudovima (modlama) od silikonske gume i drugim sudovima standardnih dimenzija zbog mogućnosti dalje obrade. Kod ovog postupka zalivanja fragmenata

rude minerala odnosno briketiranja ili impregnacije slabob vezanih i poroznih materijala preporučljivo je raditi u vakumu. Uređaji su tako osposobljeni da relativno mala po zapremini komora u koju se postavlja modla sa uzorkom može biti relativno dobro vakumirana za kratko vreme. Intenzitet vakumizacije je promenljiv i zavisi od ponašanja smola sa kojima se radi odnosno njihovog viskoziteta i brzine očvršćavanja. To su uređaji VACUMAT-JEAN WIRTZ-a; EVOPAC-STRUERS-a ili bilo kog drugog proizvođača iste namene i konstrukcije.

■ TERMO KOMPRESIONI POSTUPCI BRIKETIRANJA. Drugi termički postupak podrazumeva impregnaciju i "kalupljenje", livenje ili briketiranje fragmentiranog materijala metodom istovremenog zagrevanja i presovanja rude sa određenom, granuliranom plastičnom masom. "Briketiranje" ili "zalivanje" materijala za mineraloška - metalurška, mineralografska, ispitivanja keramike može da se vrši sa: prahom pleksiglasa, granulama bakelita, diallylphthalate, epovita. Kod ovog postupka u cilindar (kalup) određenog standardnog prečnika (2,54 mm) se postavi fragmenat rude, stene, minerala (ili neki od proizvoda PMS, koncentrat, jalovina) a preko nje naspe određena količina granulata plastične mase. Dobro homogenizirana smesa granulata plastike i materijala koji se zaliva ili briketira se uspe u cilindar i pod visokim pritiskom i određenom temperaturom za kratko vreme izvrši pretapanje plastičnog granulata u kompaktnu prozirnu masu. Preporučuje se da zidovi cilindra u kome se vrši presovanje budu premazani tankim slojem silikonske mase (silikonski sprej) da ne bi došlo do prijanjanja na zidove. Nakon hlađenja cilindra specimen se istiskuje napolje i spreman je za dalju obradu. Postoje uređaji za presovanje sa jednim ili dva radna cilindra. Za ugodniji rad i lakšu manipulaciju rudni preparati treba da imaju i određenu visinu, a da bi istovremeno njihova proizvodnja bila ekonomična jedan veći deo (50-70 %) ukupne mase vezujuće supstance (pleksiglas, bakelit ili drugi) supstituiše se gotovim briketiranim materijalom, koji je napravljen od strugotina drveta, nekog veziva i boje. Ovaj briketirani materijal ima identične dimenzije cilindra u kome se vrši presovanje a ima ulogu, pored uštede materijala i kao zaštita rudnog materijala od oštećenja usled pritiska tokom presovanja.

Tablica 4.46 Hladni postupak livenja preparata

Tip veziva	Sastav	Boja	Vezivanje	Tvrđina
Technovit 4071	metil metakrilat	Zelen proziran	5 min.	Srednja
Technovit 4001	metil metakrilat	Bezbojan	6-8 min.	Srednja
Technovit 4000	poliester	Beo	10 min.	Visoka
Varidur 10	metil metakrilat	žut	6-8 min.	Srednja
Epoplast	epoksidna smola	žut proziran	6 h	Srednja

Tablica 4. 47 Komponente za termičko presovanje preparata

Tip granulata	Boja	Tvrđina	Sastav	Deformacije
Bakelit S	crn	Srednja	Fenolna smola	neznatne
Bakelit R	crven	Srednja	Fenolna smola	neznatne
Bakelit G	zelen	Srednja	Fenolna smola	neznatne
Resinar F	providan	visoka	Akrilna smola	neznatne
Epovit G i F	crn	vrlo visoka	Epoksidna smola	nema

4.8 LITERATURA

1. Allman, M., Lawrence, F.D.: 1981: Geological Laboratory Techniques; Arco Publishing Company, INC., New York.
2. Barić, Lj., Tajder, M.: 1967: Mikrofiziografija petrogenih minerala - Školska knjiga, Zagreb.
3. Bauer, Jaroslav.: 1976: A field guide in colour to minerals, rocks and precious stones.- Svoboda, Prague.
4. Bernolak, K., Szabo, D., Szilas, L.: 1979: A mikroszkop zsebkönyv - Muszaki könyvkiadó, Budapest.
5. Bonifazi G., Massacci P.: 1992: ORTECH a structure of expert system to evaluate and characterize ore textural and structural features. - Proceedings of the first international conference on modern process mineralogy and mineral processing, Beijing, China.
6. Borodaev, Iu.S., Eremin, N.I., Mel'nikov, F.P., Starostin, V.I.: 1988: Laboratornye metody issledovaniia mineralov, rud i porod; Izdatel'stvo moskovskogo universiteta, Moskva.
7. Cameron, N. E.: 1966: Ore microscopy. - John Wiley & Sons, inc., London.
8. Carver E. Robert.: 1971: Procedures in sedimentary petrology. - Wiley-Interscience, New York.
9. Chayes, F.: 1949: A sample point counter for thin-section analysis. - Am. Mineralogist, 34, 1-11.
10. Chayes, F.: 1956: Petrographic Modal Analysis, An elementary statistical appraisal. - Johan Wiley & Sons, Inc., London.
11. Chayes, F.: 1956: Petrographic modal analysis. - John Wiley and Sons, p.113.
12. Cissarc, A.: 1950: Uputstvo za upotrebu rudnog mikroskopa. - IŠP Saveta za energetiku Vlade FNRJ, Beograd.
13. Craig, J. R., Vaughan, D. J.: 1981: Ore microscopy and ore petrography - Johan Wiley & Sons, New York.
14. DeHoff, T. Robert, Rhines, N. Frederick.: 1982: Quantitative Microscopy. - McGraw-Hill Book Company, New York.
15. Delesse, A.: 1848: Procède mécanique pour déterminer la composition des roches. - Ann. des Mines, 13, 379-388.
16. Denev, S., Stoicova, R., Boteva, A.: 1985: Razkrivane i flotacija na mineralite. - Tekhnika, Sofia.
17. Devismes M. P.: 1978: Atlas photographique des minéraux d'alluvions. -Paris, France. (Jedan nezamenljivi priručnik pri identifikaciji minerala iz rasipnih ležišta, ali takođe i od velike pomoći i pri radu sa usitnjom sirovinom ili proizvodima PMS. Atlas sadrži 641 fotografiju u boji, sa ukupno 173 mineralne vrste i njihovim osnovnim karakteristikama.)
18. Fander, H. W.: 1985: Mineralogy for metallurgists: an illustrated guide. - The Institution of Mining and Metallurgy, London.
19. Fleet, W.F.: 1926: Petrological notes on the Old Red Sandstone of the West Midlands. - Geol. Mag., 63, 505-516.
20. Freund, H.: 1966: Applied ore microscopy theory and tehnique. - The Macmillan Company, New York.
21. Galehouse, J.S.: 1969: Counting grain mounts: number percentage vs. number frequency. - J. Sed. Pet., 39, 812-815.
22. Galehouse, S. Jon.: 1971: Point Counting, -In Procedures in sedimentary petrology. - Wiley- Interscience, A divisio of Johan Wiley & Sons, New York.
23. Glagolev, A.A.: 1933: On the geometrical methods of quantitative mineralogical analysis of rocks (in Russian). - Trans. Inst. Econ. Min., Moscow, 59, 1-47.
24. Glagolev, A.A.: 1934: Quantitative analysis with the microscope by the point method. - Engineering Mining J., 135, 399.
25. Greenman, N.N.: 1951: The mechanical analysis of sediments from thin-section data. - J. Geol., 59, 447-462.
26. Gribble, C.D.: 1988: Rutley's elements of mineralogy. - Unwin Hyman, London.
27. Ineson, P. R.: 1989: Introduction to practical ore microscopy. - Longman earth science series, John Wiley & Sons, Inc., New York.
28. Iubel't, R.: 1978: Opre delitel' mineralov. - Mir, Moskva.
29. Ivanov, O. P., Kushparenko, Iu. S., Marshukova, N. K.: 1989: Tehnologicheskaja mineralogiia olovanykh rud. - Nauka, Leningrad.
30. Ivanov, V. V., Ioshko-Zaharova, O. E., Borisenko, L. F., Ovchinnikov, L. N.: 1989: Geologicheskii spravochnik po siderofilnym i khalkofilnyim redkim metallam. - Izdatelstvo "Nedra", Moskva.
31. Izoitko, V. M.: 1989: Tehnologicheskaja mineralogiia volframovykh rud. - Nauka, Leningrad.
32. Janjić, S., Ristić, P.: 1989: Mineralogija. - Naučna knjiga, Beograd
33. Janković, S.: 1981: Ležišta mineralnih sirovina - geneza rudnih ležišta. - Rudarsko-geološki fakultet Beograd, Beograd.
34. Jones M. P.: 1983: The characterisation of ores and mineral products by automatic image analysis of mineralogical features. - Spec. Publ. geol. Soc. S. Afr., Johannesburg 7, 475-478.
35. Jones, Meurig P.: 1987: Applied Mineralogy a quantitative approach. - Graham and Trotman Ltd., London.
36. Kameron, Iu.N.: 1966: Rudnaia mikroskopiia; Mir, Moskva.
37. Korenman, I. M.: 1947: Mikrokristalloskopiia. - Goskhimizdat, Moskva.
38. Kulikov, B. F., Zuev, V. V., Vainshenker, I. A.: 1978: Mineralogicheskii spravochnik tekhnologa-obogatitelja. - Nedra, Leningrad.
39. Kuzin, M., Egorov, N.: 1979: Field manual of minerals.- Mir publishers, Moscow.
40. Li, A.F.: 1967: Mineralogicheskoe isledovanie rud tsvetnykh i redkikh metallov. - Nedra, Moskva.
41. Meseniashin, A. I.: 1978: Elektricheskaja separatsiia v sil nykh poliakh. - Nedra, Moskva.

42. Milovskii, A.V., 1979: Mineralogia i petrografia. - Izdatelstvo "Nedra", Moskva.
43. Mitchell, R. S., Henley, J. R., 1982: Mineral names - What do they mean? - Mir, Moskva. (na ruskom)
44. Naidenova, Evdokiia, Zaprianova, Nevena., 1958: Rukovodstvo za opredeliane na rudni minerali pod mikroskopa. - Izdatelstvo "Nauka" i izkustvo", Sofiia.
45. Nemec, Frantisek., 1982: Kliuch k opredeleniiu mineralov i porod. - Izdatelstvo "Nedra", Moskva.
46. Packham, G.H., 1955: Volume-, weight-, and number-frequency analysis of sediments from thin-section data. - J. Geol., 63, 50-58.
47. Pellant, C., 1993: Kőzetek és ásványok; Egyetemi nyomda, Budapest.
48. Pelto, C.R., 1952: The mechanical analysis of sediments from thin-section data: a discussion. - J. Geol., 60, 402-406.
49. Rosiwal, A., 1898: Über geometrische Gesteinsanalysen. - Verh. der Kaiserlich-Königlichen Geol. Reichsanstalt, 143-175.
50. Russ, C. John., 1986: Practical stereology. - Plenum press, New York and London.
51. Rutley, F., 1988: Rutley's elements of mineralogy. - 27th edition. - Unwin Hyman, London.
52. Schumann, Walter., 1973: Steinen+mineralien. - BLV Verlagsgesellschaft GmbH, München.
53. Schumann, Walter., 1985: Collectionner mineraux, roches et fossiles. - Bordas, Paris.
54. Semenov, E. I., Iushko-Zakharova, O. E., Maksimiuk, I. E., 1981: Mineralogicheskie tablitsy, Spravochnik. - Nedra, Moskva.
55. Shand, S.J., 1916: A recirding micrometer for geometrical rock analysis. - J. Geol., 24, 394-404.
56. Sobolev, R.N., 1970: Metody opticheskogo issledovaniia mineralov, Nedra, Moskva.
57. The Encyklopedia of microscopy. 1961: - Edited by George L. Clark., Reinhold publyishing corporation, New York.
58. The Encyklopedia of mineralogy. 1985 - Edited by Keith Frye., Hutchinson Rosys publishing company, Stroudsburg, Pennsylvania.
59. The Macdonald Encyclopedia of Rocks & Minerals. 1988: - Macdonald & Co (Publishers) Ltd., London.
60. Tomanec R., 1992: Quantitative mineralogical measurement technique for mineral liberation and development in mineral processing. - Proceeding of IV International Mineral Processing Symposium, Antalia, Turkey.
61. Tomanec, R., 1989: Stepen oslobadanja minerala u zavisnosti od sadržaja korisne komponente u sirovini i finoće usitnjavanja. - Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
62. Uytendogaardt, W., Burke, E.A.J., 1985: Tables for microscopic identification of ore minerals. - Dover publications, Inc. New York.
63. Van der Plas, L., 1962: Preliminary note on the granulometric analysis of sedimentary rocks. - Sedimentology, 1, 145-157.
64. Verbitskii, P.G., 1967: Osnovy kristallooptiki i metody izuchenii mineralov pod mikroskopom. - Izdatel'stvo Kievskogo universiteta, Kiev.
65. Vincezo De Michele., 1972: Dictionnaire de mineralogie et petrographie. - Grange Bateliere S. A., Paris.
66. Volynskii, I. S., 1947: Opredelenie rudnykh mineralov pod mikroskopom. Tom I, II. - Gostgeoizdat, Moskva.
67. Whitten, D. G. A., Brooks, J. R. V., 1973: A Dictionary of Geology. - Penguin Books Ltd., Harmondsworth.

1

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

5

SADRŽAJ GLAVE 5

5.1 ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA MINERALNE SIROVINE I PROIZVODA PMS 141

5.1.1 Uvod.....	141
5.1.2 Definicija krupnoće zrna	141
5.1.3 Krupnoća zrna i oblik.....	142
5.1.4 Metode određivanja granulometrijskog sastava	144
5.1.5 Masa uzorka za analizu granulometrijskog sastava	144

5.2 SITOVNA ANALIZA (PROSEJAVANJE) 145

5.2.1 Način izvođenja.....	147
5.2.2 Postupak izvođenja sitovne analize.....	147
5.2.3 Određivanje granulometrijskog sastava uzoraka pulpe.....	149
5.2.4 Rad uređaja za prosejavanje.....	150
5.2.5 Laboratorijska sita.....	150
5.2.6 Efekat prosejavanja	152
5.2.7 Način prikazivanja granulometrijskog sastava.....	152
5.2.8 Tablično prikazivanje granulometrijskog sastava	152
5.2.9 Grafičko prikazivanje granulometrijskog sastava	153
5.2.10 Analitičko prikazivanje granulometrijskog sastava	155
5.2.11 Statistička obrada podataka granulometrijskog sastava materijala	156
5.2.12 Određivanje granulometrijskog sastava smeše dva ili više proizvoda	157
5.2.13 Grafičko određivanje granulometrijskog sastava smeše dva proizvoda.....	158
5.2.14 Spajanje uzoraka različitog granulometrijskog sastava (primer iz laboratorije)	159
5.2.15 Granulometrijski i hemijski sastav sirovine.....	160
5.2.16 Granulometrijske i hemijske karakteristike odseva.....	161
5.2.17 Spajanje uzoraka različitog granulometrijskog sastava i različitog hemijskog sastava	163

5.3 GRANULOMETRIJSKA ANALIZA ZRNA MALIH PREČNIKA (SUB SITOVNA ANALIZA) 163

5.3.1 Uvod.....	163
5.3.2 Izbor uređaja za analizu	163
5.3.3 Primena	165
5.3.4 Potrebni podaci.....	166
5.3.5 Sredine klasiranja	166
5.3.6 Raspon krupnoće.....	166
5.3.7 Tačnost	167
5.3.8 Broj uzoraka	167

5.3.9 Količina uzorka	167
5.3.10 Vrsta uzorka	167
5.3.11 Vreme trajanja analize	167
5.3.12 Cena opreme i cena analize	167
5.3.13 Metode i uređaji pri granulometrijskoj analizi zrna malih prečnika	168
5.3.14 Principi sedimentacijske analize	168

5.4 ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA SEDIMENTACIJSKIM METODAMA

5.4.1 Sedimentaciona vaga Figurovskog	169
5.4.2 Sedimentaciona vaga Sartorius	171
5.4.3 Sedimentaciona analiza metodom čaša - beaker decantation metod	175
5.4.4 Sedimentaciona analiza - Sabanini metod	176
5.4.5 Metoda pipetiranja po Andreasen-Borner-u	177
5.4.6 Andreasen-ova centrifugalna pipeta	180
5.4.7 Granulometrijske analize metodama hidrometrisanja	181
5.4.8 Metode hidrometrisanja	181
5.4.9 Areometrijska metoda po Casagrande-u	181
5.4.10 Korekcije	182
5.4.11 Fotosedimentacijske metode	185

5.5 METODE ELUTRIJACIJE

5.5.1 Warman-ov ciklosajzer	187
5.5.2 Blajov elutriator	188
5.5.3 Holtenov elutriator	189
5.5.4 Centrifugalni elutriator Bahco	189
5.5.5 Vazdušni elutriator "Alpina"	191
5.5.6 Određivanje granulometrijskog sastava pneumatskim sitima "Alpina"	192
5.5.7 Gilson-ova ultrazvučna mikro sita	192
5.5.8 Određivanje granulometrijskog sastav elektroimpulsnim analizatorom	193
5.5.9 Određivanje granulometrijskog sastava ili veličine zrna laserskim granulometrom	194
5.5.10 Izračunavanje ekvivalentnih prečnika	197

5.6 MIKROSKOPSKE METODE MERENJA VELIČINE MINERALNIH ZRNA

5.6.1 Optički mikroskop	198
5.6.2 Elektronski mikroskop	199
5.6.3 Analizator slike	199

5.7 LITERATURA

anec

167
167
167
167
168
168

169

169
171
175
176
177
180
181
181
181
182
185

186

187
188
189
189
191
192
192
193
194
197

98

198
199
199

99

GLAVA 5

5.1 ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA MINERALNE SIROVINE I PROIZVODA PMS

5.1.1 UVOD

Uzorak rude ili bilo koje sirovine sačinjavaju komadi i zrna različiti po obliku i veličini zrna. Raznolikost oblika znatno otežava i donekle ima uticaja na određivanje veličine zrna. Primarna uloga precizne karakterizacije zrna mineralne sirovine, je u dobijanju kvantitativnih podataka o njihovoj krupnoći i analiza raspodele mineralnih zrna po krupnoći u samoj sirovini. međutim, krupnoću zrna nepravilnih oblika nije moguće uvek tačno odrediti. Terminu dužina, širina, debljina ili prečnik ponekad nemaju smisla jer mora biti određen veliki broj ovih vrednosti.

Samo se za zrna pravilnih oblika može tačno i relativno jednostavno odrediti njihova veličina, odnosno prečnik zrna. Kod zrna sferičnog oblika dovoljno je odrediti prečnik i time su definisana i sva druga svojstva (obim, površina i specifična površina). Kod zrna oblika kocke, svojstveno mineralima koji poseduju cepljivost po stranicama kocki, određivanje veličine je nešto složenije. Za kocku je karakteristična dužina stranice; veličina zrna može da se definiše dužinom ivice, dijagonalom strane ili dijagonalom kocke; za neke druge pravilne forme zrna karakteristične su druge odgovarajuće dimenzije. Prema uzetom parametru mogu se dalje odrediti i ostala geometrijska svojstva zrna.

Za zrna nepravilnih oblika, prikladno je njihovu krupnoću izražavati preko jednog pokazatelja, kao što je to, vrlo često upotrebljavan, ekvivalentni prečnik. Izraziti krupnoću zrna nepravilnog oblika ekvivalentnim prečnikom znači izraziti ga preko dijametra lopte, koja ima istu zapreminu kao i nepravilno zrno. Iskazani ekvivalentni prečnik najčešće zavisi od metoda merjenja, stoga se tehnike određivanja krupnoće zrna moraju, kad god je to moguće, duplirati odnosno kombinovati zbog same kontrole rada.

Postoji više načina izražavanja ekvivalentnih prečnika. Tako je na primer Stokes-ov prečnik određen sedimentacijskim i elutrijskim metodama; prečnik projektovane površine kruga određuje se mikroskopski, dok se prečnik koji odgovara otvoru sita određuje prosejavanjem. Ovaj poslednji odgovara prečniku lopte (kuglice) koja je jednaka širini otvora kroz koji je zrno upravo prošlo.

5.1.2 DEFINICIJA KRUPNOĆE ZRNA

Zrna predstavljaju monomineralne ili polimineralne agregate kristala minerala. Poznato je da minerali kristališu: teseralno, heksagonalno, tetragonalno, triklinično, monoklinično, rombično, romboedarski ili ih nalazimo kao gelske forme odnosno u amorfnom stanju. Prema tome, pri karakterizaciji zrna minerala, u pogledu njihove krupnoće, neophodno je odrediti izvesne veličine koje definišu krupnoću zrna.

Pitanje je kojom dimenzijom izraziti krupnoću kod komada, zrna ili čestica nepravilnog oblika, kakvih uvek ima u proizvodima pripreme i koncentracije mineralnih sirovina. Krupnoća komada i zrna nepravilnog oblika izražava se pomoću srednjeg prečnika (d_s) ili odgovarajućeg ekvivalentnog prečnika (d_e).

Mnoga zrna koja su nepravilnog, uglastog oblika (ali simetričnog oblika), mogu da se opisuju nekom karakterističnom dimenzijom koja je ekvivalentna prečniku kod sferičnih zrna. Ekvivalentni prečnik zavisi od metode i načina njegovog određivanja, pa postoje različiti ekvivalentni prečnici. Neki ekvivalentni prečnici zrna približno sferičnog oblika, određeni su već samom metodom merjenja. Neke, pak, metode daju ekvivalentne prečnike koji zavise od načina kako se odabira dimenzija za merenje.

Ekvivalentni prečnici koji zavise samo od metode određivanja su:

• Površinski ekvivalentni prečnik koji predstavlja prečnik sfere iste površine kao i dato zrno. Izračunava se iz podataka određivanja površine čestica;

• Zapreminski ekvivalentni prečnik predstavlja prečnik sfere koja ima istu zapreminu kao i dato zrno. Izračunava se iz podataka određivanja zapremine zrna;

• Stokes-ov prečnik koji se dobija iz rezultata merenja sedimentacijom u području laminarnog kretanja, izračunava se pomoću Stokes-ove jednačine.

5.1.3 KRUPNOĆA ZRNA I OBLIK

Prečnik (d_i) komada ili zrna nepravilnog oblika izračunava se kao aritmetička, geometrijska ili harmonijska sredina dužina tri međusobno upravne ose.

Kod trodimenzionalnih (3D) merenja krupnoća komada ili zrna se može izraziti srednjim prečnikom $\bar{d}_s$, s obzirom da se dimenzije zrna mogu definisati sa tri ortogonalna prečnika, na jedan od načina:

Aritmetička sredina

$$d_{sr} = \frac{a + b + c}{3}$$

Geometrijska sredina

$$d_{sr} = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}$$

koja predstavlja aritmetičku sredinu njihovih logaritama.

Harmonijska sredina

$$d_{sr} = \frac{a + b + c}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c}}$$

Definisanje dimenzija – krupnoće zrna i zakon raspodele. Kod analize slika (stereo binokularni mikroskop, optička mikroskopija u propuštenu ili odbijenom svetlu, SEM) merenja se vrše u dve dimenzije (2D) tako se veličina zrna može izraziti jednom dimenzijom ili srednjim prečnikom na više načina.

Nakon što je uopšteno prikazano kako se sve mogu meriti veličine vezane za krupnoću zrna ili čestica, kao i kojim se oblikom oni mogu izraziti, neophodno je to mnoštvo, taj skup veličina obraditi kao određenu distribuciju i dati njene srednje vrednosti kao karakteristične parametre. Jedan od njih je srednja vrednost koja može da se odnosi na određene klase krupnoće sirovine – ograničene nekim graničnim veličinama, ili pak da se izrazi za celokupnu fragmentiranu (usitnjenu) sirovinu.

Za definisanje srednje vrednosti prečnika zrna ili čestica u datoj sirovini neophodno je nekoliko parametara: odsečki ili prečnici d_i (mereni na određeni način, vidi sliku 5.1); broj zrna u svakom intervalu krupnoće f_i kao frekvencija ili učestalost; i ukupan broj merenih zrna n , a mogu se iskazati na više načina.

Aritmetička sredina

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum d_i \cdot f_i$$

Geometrijska sredina

$$\bar{d}_g = \sqrt[n]{d_1 \cdot f_1 \cdot d_2 \cdot f_2 \cdot \dots \cdot d_n \cdot f_n}$$

Harmonijska sredina

$$\bar{d}_{ha} = \left[\frac{1}{n} \cdot \sum \left(\frac{f_i}{d_i} \right) \right]^{-1}$$

Srednji maseni prečnik

$$\bar{d}_m = \sqrt[3]{\frac{\sum f_i \cdot d_i^3}{n}}$$

Linearni srednji prečnik

$$\bar{d}_l = \frac{\sum f_i \cdot d_i^2}{\sum f_i \cdot d_i}$$

Površinski srednji prečnik

$$\bar{d}_s = \frac{\sum f_i \cdot d_i^3}{\sum f_i \cdot d_i^2}$$

Maseni srednji prečnik

$$\bar{d}_w = \frac{\sum f_i \cdot d_i^4}{\sum f_i \cdot d_i^3}$$

Dok se osnovne statističke veličine i raspodela zrna različite krupnoće izražavaju sledećim parametrima.

Standardna devijacija

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum (d_i - \bar{d})^2 \cdot f_i}$$

Koeficijent varijacije krupnoće zrna u sirovini

$$K_v = \frac{\sigma_d}{d_{SR}} = \frac{\sqrt{\sum (d_{sr} - \bar{d})^2 \cdot M_i / \sum M_i}}{d_{SR}} \cdot 100$$

Normalna raspodela

$$f_{(d)} = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{d_i - \bar{d}}{\sigma} \right)^2 \right]$$

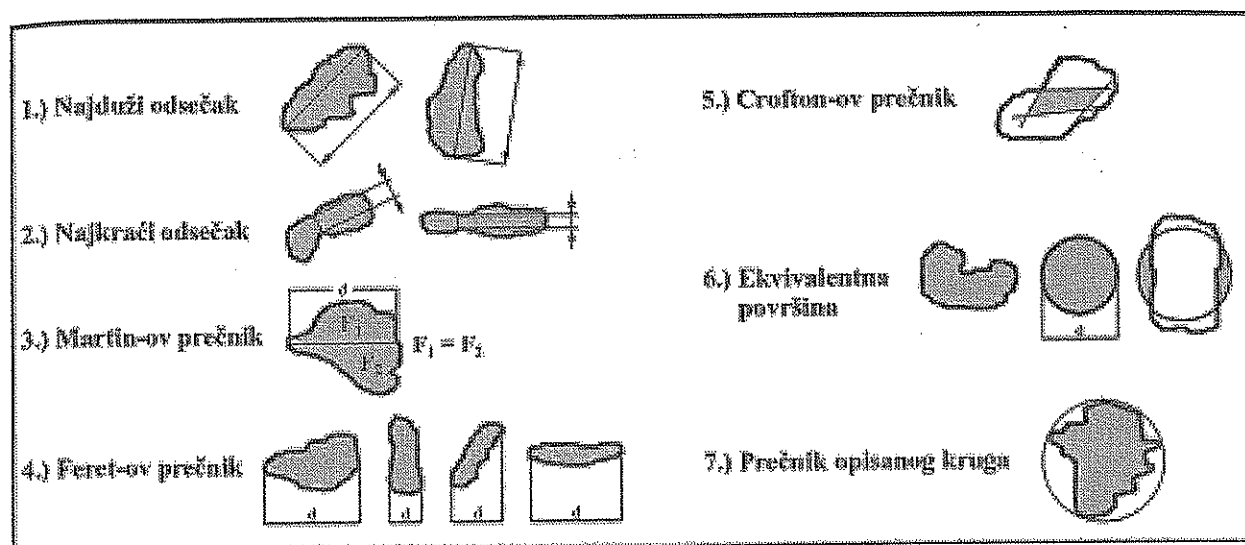
Log normalna raspodela

$$f_{(\log d)} = \frac{1}{\log \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\log d_i - \log \bar{d}}{\log \sigma} \right)^2 \right]$$

Kod mikroskopskih metoda (direktnog merenja u dve dimenzije) određivanja krupnoće zrna odnosno ekvivalentnih prečnika, koriste se i druge veličine. Na slici 5.1 su prikazani različiti postupci iskazivanja dimenzija zrna kod različitih sistema analiza slika. Tako imamo sledeće: najčešće korišćen Feret-ov prečnik, zatim Martin-ov prečnik, Crofton-ov prečnik, projektovani prečnik, prečnici na osnovu najdužih odsečaka ili na osnovu najkraćih odsečaka, kao i ekvivalentni perimetar, ekvivalentna površina i ekvivalentna zapremina.

❖ ❖ ❖

Kod mineralnih zrna, uglavnom nepravilnog oblika, za procese PMS je često najprihvatljiviji način izražavanja krupnoće zrna preko jednog pokazatelja, odnosno preko neke ekvivalentne forme. Za ekvivalentnu formu najčešće se uzima sferična. Sfera omogućava lako izračunavanje obima na preseccima, površine, zapremine, specifične površine, brzine padanja zrna u vodi i vazduhu itd.



Sl. 5.1 Prikaz različitih postupaka merenja dimenzija zrna ili čestica: najduži prečnik; najkraći prečnik; Martin-ov prečnik; Feret-ov prečnik; Crofton-ov prečnik; Prečnik opisanog kruga; upisanog kruga; Prečnik kruga ekvivalentne površine; ekvivalentna zapremina.

U jednoj smeši zrna različite krupnoće, kakve su najčešće usitnjene sirovine, srednji prečnik zrna može da se izrazi na više načina. Ovaj parametar – srednja krupnoća, matematičko očekivanje kako ga iskazuju u matematici, i način kako ga iskazati, zavisi prvenstveno od samog procesa PMS za koji je on relevantan i za koji, na određeni način iskazana srednja vrednost krupnoće, predstavlja kritičan faktor.

Definisanje dimenzija odnosno srednje vrednosti krupnoće zrna u datoj sirovini, u širem rasponu (ukupna sirovina) ili užem rasponu (užoj klasi krupnoće) može se iskazati sledećim veličinama:

Prečnik d_v koji može da se definiše kao prečnik sfere ekvivalentne zapremine datog zrna.

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_p}{\pi}} = 1,241 \cdot \sqrt[3]{V_p} = 1,24 \cdot \sqrt[3]{\frac{m}{\rho}}$$

gde je V_p zapremina zrna, odnosno zapremina sfere (V) koja se određuje po obrascu:

$$V = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3}$$

zamenom $r = d_v/2$ dobija se

$$V_p = \frac{4 \cdot \pi \cdot d_v^3}{6} \quad \text{ili da je } V = m/\rho$$

gde su:

m - masa zrna;

ρ - gustina zrna.

Odakle je dat d_v kao ekvivalentni prečnik.

Isto tako prečnik d_s može da se definiše kao prečnik ekvivalentne slobodne površine datog zrna.

$$d_s = \sqrt{\frac{A_{sp}}{\pi}} = 0,564 \cdot \sqrt{A_{sp}}$$

gde je A_{sp} slobodna površina zrna.

Prečnik d_{SM} koji se definiše kao prečnik zrna ekvivalentne srednje vrednosti slobodne površine svih zrna u smeši.

$$d_{SM} = \sqrt{\frac{A_{SM}}{\pi}} = \sqrt{\frac{\sum d_s^2}{N}}$$

gde je d_s prečnik sfere koja ima istu slobodnu površinu kao i odgovarajuće zrno; a A_{SM} je srednja vrednost slobodne površine N zrna sirovine

$$A_{SM} = \frac{1}{N} \cdot \sum (\pi \cdot d_s^2)$$

Prečnik d_{VM} koji se definiše kao prečnik zrna ekvivalentne srednje vrednosti zapremine svih zrna u smeši.

$$d_{VM} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{vp}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{1}{N} \cdot \sum d_v^3}$$

gde je d_v prečnik sfere ekvivalentne zapremine odgovarajućeg zrna.

Prečnik d_{VSM} se definiše kao prečnik sfere koja ima istu zapreminu kao srednja vrednost slobodnih površina datih zrna u mešavini.

$$d_{VSM} = \frac{\sum d_v^3}{\sum d_s^2} = \frac{d_{VM}^3}{d_{SM}^2}$$

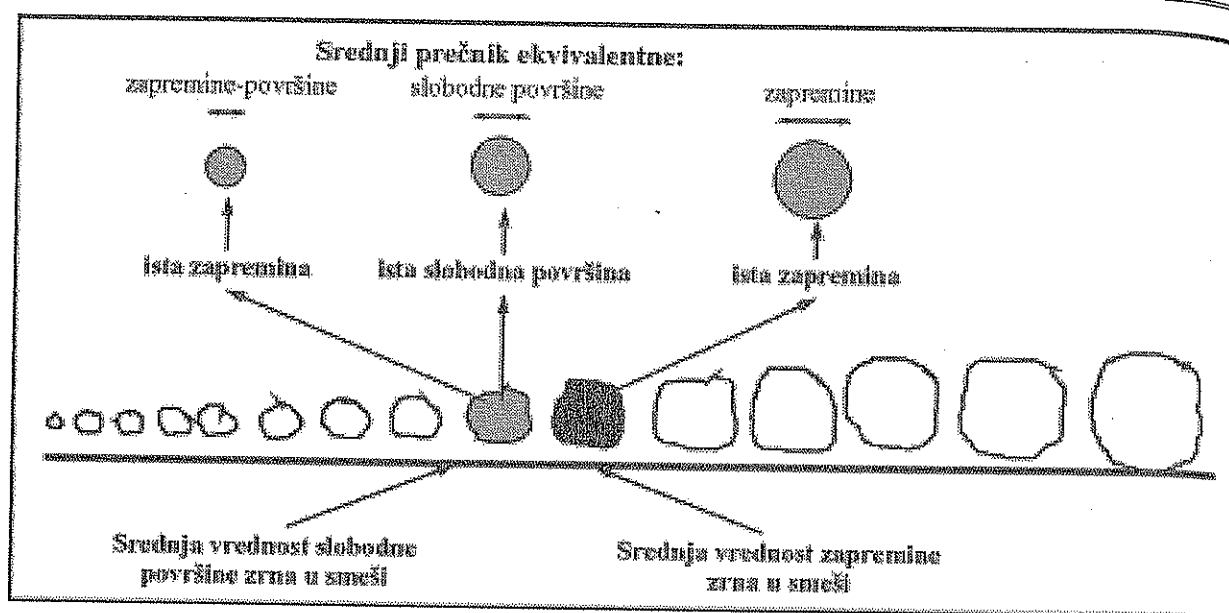
Ilustracija izloženih definicija "srednjeg prečnika zrna", smeše različite krupnoće i oblika (ne sferičnih zrna) data je na slici 5.2.

Prema tome ekvivalentni prečnik zrna (d_e) predstavlja prečnik sfere koja ima istu zapreminu (V); istu površinu (S) ili istu brzinu slobodnog padanja (V_o) kroz neki fluid kao i zrno nepravilnog oblika.

Takoe, jedan od načina određivanja dimenzija zrna preko jedne dimenzije (1D), je prosejavanjem sitima, kada se krupnoća iskazuje srednjim prečnikom otvora sita ($d_s = d_{sita}$) na prosejnoj površini (kvadratni ili okrugli).

❖ ❖ ❖

Izmereni podaci o krupnoći zrna, bilo kojim postupkom, moraju, tamo gde je moguće, biti dopunjeni i sa par opisnih karakteristika, koje će bliže ukazati na sam oblik zrna. Pri karakterizaciji zrna mineralne sirovine



Sl. 5.2 Ilustracija definicija "srednjeg prečnika zrna", smeše zrna različite krupnoće i oblika

koriste se uglavnom sledeći termini: kristalizovana, kristalasta, kriptokristalasta i amorfna. Dok se oblici zrna mineralnih sirovina opisuju terminima: igličasta, prtičasta, vlaknasta, pločasta, tabličasta, lamelarna, prizmatična i dr. Agregati kristala, mono- ili polimineralni, što je najčešći vid sklopa zrna usitnjene mineralne sirovine, se opisuju terminima: zrnasta, sferična, grozdasta, nodularna, mrežasta, dendritična, zrakasta, bubrežasta i dr.

Sad kada smo videli kako se mere dimenzije zrna možemo zaključiti sledeće:

- Za usitnjavanje i klasiranje od značaja su gabaritne dimenzije komada i zrna, te njihovu krupnoću treba izražavati pomoću srednjeg prečnika zrna izračunatog po tim formulama.

- Za hidrauličnu klasifikaciju, gravitacijsku koncentraciju i hidraulični transport posebno je značajna brzina kretanja zrna u fluidu, te njihovu krupnoću treba izraziti pomoću hidrauličnog prečnika.

- U procesima kod kojih površina zrna opredeljuje njihov tok ili kvalitet proizvoda (flotacijska koncentracija) ili brzinu rastvaranja, krupnoću nepravilnih zrna treba izraziti pomoću ekvivalentnih prečnika (d_{eq}) sfere iste površine, iste zapremine).

5.1.4 METODE ODREĐIVANJA GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA

Krupnoća smeše zrna u nekoj sirovini izražava se njenim granulometrijskim sastavom, tj. odnosnom klasa zrna različite krupnoće. U zavisnosti od krupnoće sirovine za određivanje granulometrijskog sastava primenjuje se jedna od sledećih metoda:

- metoda prosejavanja ili sitovna analiza;
- metode sedimentacije;
- metode elutriacije;
- mikroskopske metode; i
- druge specifične metode određivanja granulometrijskog sastava za zrna - čestice malih dimenzija.

5.1.5 MASA UZORKA ZA ANALIZU GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA

Masa srednjeg reprezentativnog uzorka na kome se određuje granulometrijski sastav zavisi od krupnoće i vrste sirovine. Ona se može odrediti iz poznatih jednačina ili iz empirijskih, tabelarnih podataka.

U tablici 5.1 date su minimalne mase srednjeg uzorka za određivanje granulometrijskog sastava rude.

Tablica 5.1 Minimalne mase uzorka za određivanje granulometrijskog sastava

Gornja granična krupnoća (mm)	Masa uzorka (kg)
16-11	40,00
11-8	12,50
8-6	5,00
6-4	2,00
4-2	1,00
2-1	0,50
1-0,5	0,25
0,-0,25	0,10
<0,25	0,05

Tablica 5.2 Minimalna količina uzoraka za sitovnu analizu neophodna za nivo pouzdanosti od 95 % (gustina zrna oko 3000 kg/m³).

Srednji prečnik zrna u najkrupnijoj klasi krupnoće (može i g/gk)	Minimalna masa uzorka potrebna da zadovolji nivo:	
	5 % pouzdanosti	2 % pouzdanosti
10 000 μ m	23 kg	150 kg
1 000 μ m	23 g	150 g
100 μ m	0,023 g	0,15 g
10 μ m	0,000 023 g	0,000 15 g

*Podatke iz tablice treba uzeti sa rezervom, jer su dati pri idealnim uslovima.

U istu svrhu, određivanje minimalne mase uzorka za granulometrijski sastav, možemo se koristiti i jednačinom:

$$Q_{\min} = d (0,04 \cdot d + 1) \text{ (kg)}$$

gde je d - prečnik najkrupnijih komada u uzorku (u mm).

U tablici 5.2 dati su podaci za uobičajeni nivo pouzdanosti 95 % i preciznost 5 %, gde je $V = 0,02555$.

❖ ❖ ❖

Minimalna količina uzorka, za sitovnu analizu, po vrlo detaljnim izučavanjima Gy-a (1982.), neophodna da zadovolji postavljene uslove tačnosti tokom prosejavanja, zavisi od krupnoće zrna od prisutnih minerala u sirovini od oblika zrna tih minerala i stepena oslobođenosti minerala, i može da se izvede iz osnovne jednačine:

$$\frac{M \cdot L}{L - M} = \frac{C \cdot d^3}{\sigma^2}$$

odakle sledi

$$M = \frac{C \cdot d^3}{\sigma^2}$$

jer je masa uzorka za granulometrijsku analizu najčešće mnogo manja od mase primarnog uzorka. Tako imamo da je:

- M - minimalno dovoljna masa uzorka za analizu (g);
- L - ukupna masa primarnog uzorka koji je uzorkovan (g);
- C - konstanta sirovine (g/cm³);
- d - dimenzije najkrupnijih komada uzorkovane sirovine, (cm);
- σ - statistička greška koja je prihvaćena u analitičkim rezultatima (obično sadržaj ili elementarni sastav uzorka);

Konstanta sirovine C je jednaka $C = f \cdot l \cdot g \cdot m$ i zavisi od

- f - parametar oblika zrna (obično se uzima 0,5 osim za rudu zlata gde je $f = 0,2$);
- l - parametar oslobođenosti minerala (koji varira od 0 za kompletno homogeni materijal, do 1,0 za potpuno heterogeni materijal);

g - granulometrijska karakteristika (g varira od 0,25 do 1,0);

m - parametar orudnjenja mineralne sirovine se izražava iz

$$m = \frac{1-a}{a} \cdot [(1-a) \cdot r + a \cdot t]$$

gde su:

- r - srednja gustina korisnog minerala;
- t - srednja gustina minerala jalovine;
- a - srednji sadržaj zrna minerala u uzorkovanoj masi;

Iz čega zaključujemo da Gy-ova jednačina favorizuje i daje dobre rezultate kod uzorkovanja onih materijala koji su predhodno vrlo fino samleveni, pošto u jednoj domini dominira krupnoća zrna d^3 . Međutim, za različita ispitivanja sirovine (posebno mineraloška) nije racionalno (ponekad čak i neprihvatljivo) usitnjavati sirovinu da bi bila uzorkovana.

❖ ❖ ❖

Na procese koncentracije, svih vidova mineralnih sirovina, značajan uticaj ima njena krupnoća. U procesu drobljenja i mlevenja sirovine, neprestano se menja granulometrijski sastav, određen masenim udelom zrna različite krupnoće, koja ulaze u sastav analiziranog uzorka.

Na osnovu granulometrijskog sastava ocenjuje se efikasnost rada drobilica, mlinova i uređaja za klasiranje. Od prvorazredne je važnosti određivanje kvaliteta usitnjavanja i utvrđivanje stepena oslobođenosti korisnih minerala od minerala jalovine, u različitim klasama krupnoće. U industrijskim procesima stepen oslobađanja (otvaranja sirovine) se određuje na osnovu finocne mlevenja korisnih minerala, a prema tome i uspešnost koncentracije odnosno kvaliteta koncentrata. Takođe, vrlo važnu ulogu ima krupnoća zrna ili čestica i sadržaj mulja na postupke zgušnjavanja, filtriranja i sušenja.

Imajući u vidu prvorazredni značaj poznavanja granulometrijskog sastava mineralnih sirovina u industrijskim procesima, neophodno je sistematsko praćenje krupnoće zrna ili čestica u procesu drobljenja i mlevenja. U praksi se u tu svrhu, najčešće, koristimo sitovnom analizom.

5.2 SITOVNA ANALIZA (PROSEJAVANJE)

Sitovna analiza (sejanje, prosejavanje, rešetanje) je jedna od veoma često primenjivanih analiza u pripremi mineralnih sirovina, i koristi se za određivanje granulometrijskog sastava uzoraka sirovina, za klasiranje gotovih proizvoda, za kontrolu procesa usitnjavanja sirovine, bilo da je reč o laboratorijskim ispitivanjima, naučno-istraživačkom radu ili industrijskim procesima.

Sitovna analiza je proces razdvajanja uzorka pomoću sita na klase krupnoće, sa užim ili širim rasponom krupnoće klasa.

Vrste prosejavanja. Uzorak može da se prosejava suvim i mokrim postupkom odnosno kombinacijom ova dva - kombinovanim postupkom, a to može da se izvrši ručno i mehanički, u zavisnosti od prirode same sirovine, cilja klasiranja, tačnosti rezultata i opremljenosti laboratorije.

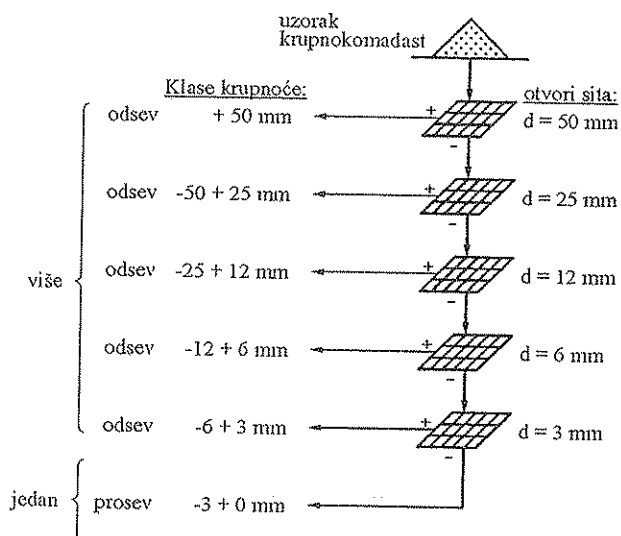
Suvo prosejavanje se primenjuje kod klasiranja krupnokomadaste sirovine (najčešće ručno), ređe na sitnoznoj sirovini, jer rezultati klasiranja nisu visoke tačnosti. Ako se sirovina prosejava standardnom serijom sita, prosejavati zaključno sa sitom 200 # i to mehanički, izuzev u slučajevima kada se iz uzorka izdvaja jedna ili nekoliko klasa, kada prosejavanje može da bude ručno.

Rekli smo da suvo prosejavanje možemo izvršiti ručnim ili mehaničkim postupkom.

Ručno prosejavanje se izvodi na krupnokomadastoj sirovini sa velikim rasponom krupnoće i na sitnoznoj sirovini kada su potrebni izuzetno tačni rezultati (u okviru naučno-istraživačkog rada, usavršavanja procesa i dr.). Uzorak se prosejava kroz svako predviđeno sito sve dotle dok zrna prolaze kroz prosevnu površinu. Kod ručnog prosejavanja pomoću standardnih laboratorijskih

sita, prosejavanje treba da je ravnomerno i da količina uzorka na situ odgovara približno monosloju.

Prema propisima za veoma preciznu analizu kod ručnog prosejavanja treba se pridržavati sledećeg načina rada: Materijal se stavlja na najkrupnije sito, potpuno zasebno, a sito se snabde poklopcem odozgo i čankom odozdo. Ravnomerno prosejavanje uzorka odvijaće se, ako se na poklopcu postavljenom preko sita označi šest tačaka, koje su jedna od druge razmaknute za 60°. Sito prihvatiti desnom rukom tako da palac bude na poklopcu preko označene tačke a dlanom leve ruke udara se po strani sita na suprotnoj strani. Sa sitom se izvrši 25 kružnih pokreta praćenih sa 25 blagih udara sa strane sita sve to u trajanju od 10 sekundi. Potom sito okrenuti za 60° i nastaviti prosejavanje na isti način, i tako redom dok se ne izvrši prosejavanje sa svih šest označenih mesta na poklopcu. Ceo ciklus sastoji se iz šest puta dvadeset i pet, ili 150 udaraca sa isto toliko kružnih pokreta, za što je potreban jedan minut, čime je obezbeđeno ravnomerno prosejavanje materijala. Ova operacija se ponavlja, i vrši određeno vreme, u cilju da se utvrdi da li će još nešto materijala proći kroz sito. Naravno, prosejavanje se može produžiti u beskonačno, jer će uvek biti čestica čiji je oblik takav da mogu proći kroz sito, ako dođu u pogodan položaj u odnosu na prosevnu površinu. Sa praktične strane, prosejavanje se zaustavlja posle izvesnog vremena, čim veoma "malo" materijala odlazi u prosev, kada bi mogli smatrati da je prosejavanje praktično završeno. Prosejavanje se smatra završenim, ako količina materijala koja je prošla kroz sito u toku drugog ciklusa (koji traje jedan minut) iznosi manje od 0,05 % mase uzorka. Ovaj drugi ciklus nazivamo **kontrolnim prosejavanjem**. U slučaju da je u prvom minutu kontrolnog prosejavanja konstatovan veći maseni udeo od pomenutog, operacija se ponavlja, onoliko puta po jedan minut dok se ne postigne gornji uslov. Iz navedenog se vidi da ručno prosejavanje i granulometrijska analiza mogu biti veoma zamorni. Ovu metodu ručnog prosejavanja predložio je Gross (1925.), a koja se i danas primenjuje, s napomenom da je zahtevao čišćenje sita četkicom posle svakog minuta prosejavanja (zbog "kritičnih zrna").



Sl. 5.3 Suvo prosejavanje, ručnim postupkom.

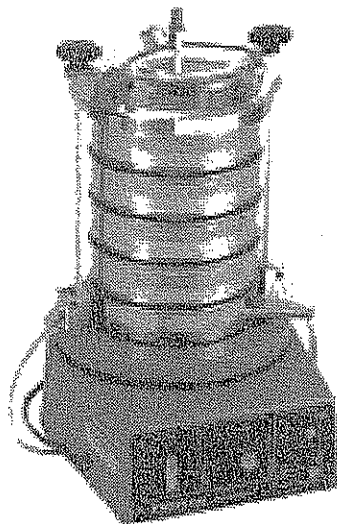
Po izvršenom prosejavanju kroz jedno sito, nadrešetni proizvod (ostatak na situ - odsev) se uklanja i meri, a

podrešetni proizvod (koji je prošao kroz sito - prosev) dalje se prosejava. Samim tim jasno je da od predviđenih sita, prvo treba prosejavati kroz sito sa najvećim otvorima, a zatim redom kroz sita sa opadanjem veličine otvora.

Primer jedne šeme ručnog prosejavanja krupnkomadastog materijala, nestandardnim laboratorijskim sitima dat je na slici (Sl.5.3). Kao što se vidi prosejavanjem se dobija više odseva (na svakom od korišćenih sita) i samo jedan prosev (podrešetni proizvod - prosev sita sa najmanjim otvorima).

Suvo mehaničko prosejavanje se primenjuje kod klasiranja sitnoznog materijala. Mehanički uređaji za prosejavanje olakšavaju i skraćuju vreme trajanja sitovne analize.

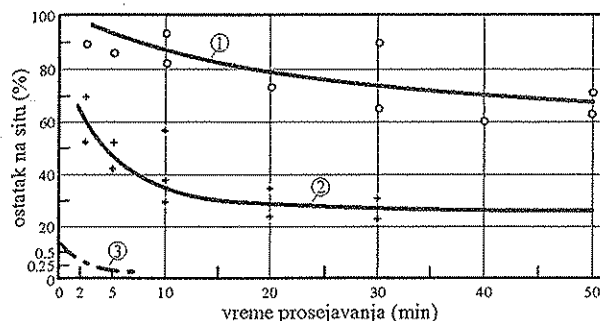
Sirovina se mehanički prosejava pomoću uređaja kao što je Ro-tap vibrouređaj, magnetni vibrator, Denver-ov aparat i drugi koji obezbeđuju ravnomerno prosejavanje i istovremeno kroz veći broj sita. Uređaji imaju ram u koji može da stane i do trinaest laboratorijskih sita, odjednom.



Sl. 5.4 Mehaničko prosejavanje uz pomoć vibracionih uređaja

Sita se slože u slog, prema opadanju veličine otvora prosevnih površina (slog čini 6-7 sita), ispod poslednjeg sita postavlja se čanak za prihvatanje proseva, a iznad prvog sita poklopac. Izmereni uzorak stavlja se na prvo sito i zatvori, a ceo slog postavi u aparat za prosejavanje. Tajmerom se predvidi određeno vreme za prosejavanje (obično je to 10 minuta). Po izvršenom prosejavanju, skidaju se sita sa vibrouređaja a prosev koji je dobijen u čanku ispod poslednjeg sita u seriji se ubacuje na prvo sito druge serije i vrši prosejavanje po istim uslovima. Kada je prosejavanje uzorka završeno, izdvaja se poslednje sito druge serije (sito sa najmanjim otvorima) i ručno prosejava (kontrolno prosejavanje) iznad tabaka hartije, u trajanju od jedne minute. Dobiveni prosev se meri i izračunava maseni udeo u odnosu na početnu količinu uzorka. Ako je masa proseva manja od 0,05 %, vreme predviđeno za prosejavanje je dovoljno, u protivnom, produžavati prosejavanje za po jedan minut više, sve dok masa ne bude manja od 0,05 %. Ovo dopunsko prosejavanje naziva se kontrolnim prosejavanjem.

Za svaku sirovinu treba eksperimentalno utvrditi vreme prosejavanja; duže prosejavanje može da dovede do usitnjavanja sirovine, a kraće ne obezbeđuje prosejavanje do kraja.



Sl.5.5 Efekat prosejavanja različitim postupcima (Ocepek); 1. prosejavanje - vibraciono horizontalno kretanje; 2. prosejavanje - vibraciono vertikalno kretanje; 3. pneumatsko sito.

Duže vreme prosejavanje, takođe, štetno utiče na mrežu sita a time i na rezultate prosejavanja (nepotrebno se oštećuje mreža i dolazi do naknadnog usitnjavanja materijala na situ).

U procesu suvog mehaničkog prosejavanja treba očekivati gubitke od 0,5 do 1,0 %; to su ona najsitnija zrna koja su izgubljena tokom sejanja u vidu prašine i ovu razliku treba dodati najsitnijoj klasi krupnoće.

Mokro prosejavanje ručnim postupkom. Mokro prosejavanje se izvodi uz pomoć vode. Ovako dobijeni granulometrijski sastav sirovine je daleko tačniji u poređenju sa suvim postupkom, jer dolazi do "pranja" zrna od nalepljenih čestica tokom prosejavanja. Mokrim prosejavanjem se počinje na situ od 200 # po Telermanu, a završava se na situ od 400 #.

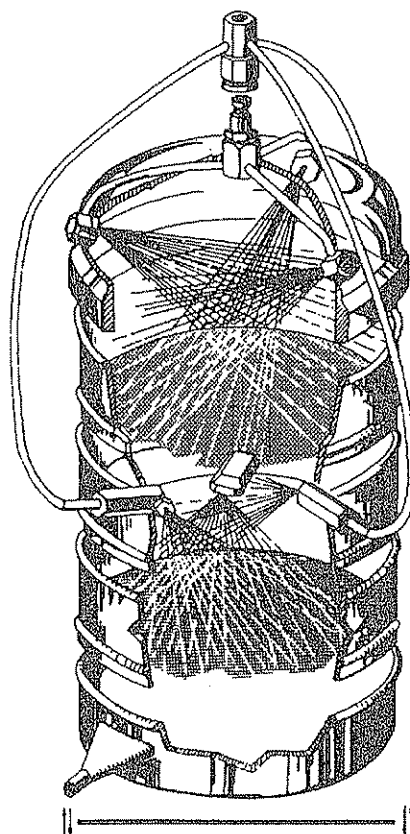
5.2.1 NAČIN IZVOĐENJA

Izmeriti uzorak, usuti ga u emajlirani sud, dodati vodu, dobro homogenizirati i uzorak propustiti kroz sito sa najmanjim otvorom na kome je predviđeno klasiranje, da bi se uklonila najsitnija klasa krupnoće - mulj, koji se prihvata u posebnom sudu. Tokom prosejavanja uzorak (suspenciju) postepeno dodavati na sito i uz mlaz vode ga prosejavati. Prosejavanje je završeno, kada je voda kojom se ispira materijal na situ potpuno bistra. Materijal koji je dobijen na situ (odsev) prebaciti na filterpapir, sušiti ga na laboratorijskoj temperaturi uz povremeno homogeniziranje (da ne bi došlo do slepljivanja i zgrudavanja). Osušeni materijal suvo prosejavati na seriji sita sa većim otvorima, odseve meriti i izračunavati masene udele pojedinih klasa u odnosu na uzorak.

Mokro prosejavanje mehaničkim postupkom se primenjuje kod klasiranja sitnozrnog materijala, a koriste se standardna laboratorijska sita. Ako se koristi Tyler-ova serija sita prosejava se zaključno sa sitom od 200 #, odnosno 400 #.

Kombinovani postupak prosejavanja podrazumeva mokro i suvo prosejavanje odnosno ručno i mehaničko. Ovaj način prosejavanja je danas najčešće primenjivan kako u laboratorijama za PMS tako i u industrijskim procesima. Primjenjuje se za klasiranje sitnozrnog materijala različitih sirovina kao i proizvoda koncentracije

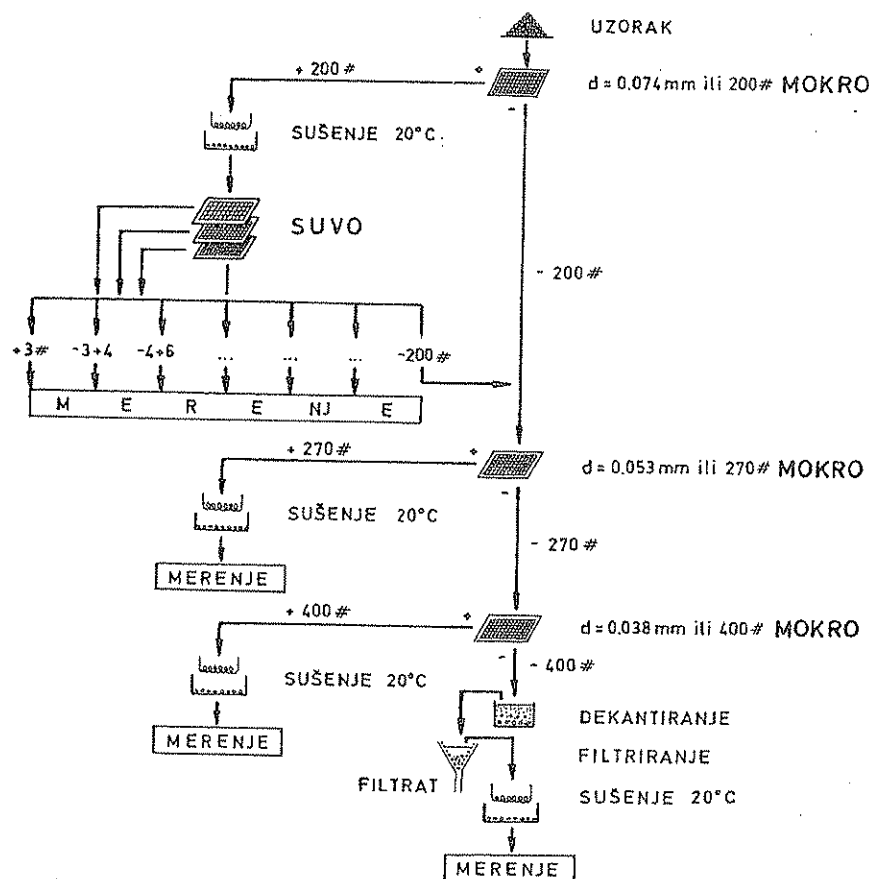
(koncentrata, međuproizvoda i jalovine). Primjenjuje se i onda kada je uzorak vlažan (pulp) ili su u uzorku prisutne koagulirane, slepljene čestice. Postupak klasiranja se izvodi na sledeći način: uzorak se u obliku suspenzije prvo prosejava na osnovnom situ od 200 #, mokrim postupkom i ispira vodom iznad posude u kojoj se hvata prosev. Ovaj deo odgovara mokrom klasiranju ručnim postupkom. Ispiranje se smatra završenim kada kroz sito prolazi bistra voda bez čestica. Prosev sita se ostavi da sedimentira, nakon čega se dekantira voda a gusta suspenzija sa sitnim česticama se podvrgava mokrom klasiranju na sitima sa manjim otvorima (250, 270, 325 i 400 #) najčešće ručno ili mehaničkim postupkom u seriji sita sa ugrađenim diznama za dovod spirne vode. Ostatak na situ od 200 # se filtrira, suši a potom prosejava na suvo pomoću serije sita u koju je uključeno i sito sa kojim je vršeno mokro prosejavanje, naravno mehaničkim postupkom. Propisana procedura je podesna za sitnozrne materijale i manje uzorke. Ispiranje većih uzoraka na najfinijem situ može dovesti do oštećenja mreže sita. Odsevi svih sita na kojima je vršeno klasiranje se suše, mere i izračunavaju maseni udeli. Kombinovano postupak prosejavanja daje najbolje rezultate i mnogo je tačniji od suvog postupka (Sl.5.7).



Sl. 5.6 Mehaničko prosejavanje mokrim postupkom uz pomoć vibro uređaja

5.2.2 POSTUPAK IZVOĐENJA SITOVNE ANALIZE

Prosejavanjem materijala na seriji sita, različitih otvora, zrna datog uzorka je moguće razvrstati po krupnoći na nekoliko klasa. Krupnoća zrna ili čestica ovako dobijenih klasa ograničena je dimenzijama otvora sita kojima je vršena analiza.



Sl.5.7 Ilustracija šeme kombinovanog postupka klasiranja samlevene sirovine

Sitovna analiza, koja se izvodi radi utvrđivanja granulometrijskog sastava materijala (utvrđivanja stepena disperznosti sitnozrnog materijala), može da se izvede na dva načina.

Prvi način, koji se primenjuje uglavnom pri mehaničkom prosejavanju, sastoji se u tome, što se analizirani uzorak uspe na sito sa najvećim otvorima u analiziranoj seriji. Prosev ovoga sita pada na sledeće, sa manjim otvorima, i tako do poslednjeg sita sa najmanjim otvorima. Ova postepenost omogućuje da se sita iz serije postave jedno na drugo i da materijal bude razvrstan na klase krupnoće u toku jedne radne operacije.

Drugi način se sastoji u tome da se uzorak na početku uspe na sito sa najmanjim otvorima, a dobijeni ostatak na situ (odsev) se prebacuje na sledeće, sa većim otvorima prosevne površine. Prednost ovakve postepenosti je u tome da krupna zrna pospešuju proces prosejavanja na sitima sa manjim otvorima. Iz ovih razloga se kod ručnog načina prosejavanja upravo preporučuje ovaj postupak prosejavanja.

Klasifikacija metoda prosejavanja sitnozrnih materijala, danas poznaje sledeće postupke:

1. Kod ručnog prosejavanja

- prosejavanje trešenjem i udaranjem (ovaj način je najjednostavniji i koristi se za većinu materijala);
- prosejavanje uz pomoć četkice (koristi se kod prosejavanja vrlo sitnozrnog, praškastog, materijala sklonog slepljivanju);
- prosejavanje ispiranjem (mokri postupak za materijale sklone razmazivanju ili slepljivanju pod dejstvom elektrostatičkog naelektrisanja).

2. Kod postupaka mehaničkog prosejavanja

- kružno i oscilatorno kretanje u horizontalnoj ravni;
- klatna sita;
- vibraciona sita;
- protresanje usled udara;
- kretanje sita po složenoj rezultujućoj trajektoriji izazvane dejstvom dva ili više mehaničkih dejstava.

3. Aerodinamičko prosejavanje (na pneumatskim sitima otvora većih od 15 μ m).

4. Ultrazvučno prosejavanje (na "štampanim" sitima otvora većih od 5 μ m).

5. Mokro prosejavanje uz pomoć vibracija i vakuma na "štampanim" mikro sitima, otvora većim od 2 μ m.

Ručno prosejavanje se preporučuje uvek kada su u pitanju važne analize kod istraživačkog rada ili kod arbitražnih analiza.

Kod ručnog prosejavanja standardnim laboratorijskim sitima, uzima se jedno sito sa čankom i poklopcem u jednu ruku, nagne prosevna površina za 10-20° u odnosu na horizontalnu ravan i uz kružne pokrete udara o dlan druge ruke sa učestalošću od oko 120 puta u minuti. Tokom jednog minuta menja se mesto pridržavanja sita bar četiri puta naravno uz udaranje o dlan druge ruke. Kod materijala koji se teže prosejava a naročito kod sita sa malim otvorima neophodno je nakon tri i pet minuta, od početka prosejavanja, a kasnije na svakih pet minuta, da se prosevna površina (sa donje strane) očisti mekom četkicom.

U slučaju prosejavanja sa nestandardnim četvrtastim sitima, sa drvenim ramom, sito se prihvata sa obe ruke,

sa gornje strane rama i pri promenljivom nagibu do 20° ritmično pomera napred i nazad, stvarajući pri tom utisak horizontalnog i vertikalnog kretanja materijala na situ. Kretanjem materijala u vis i pad na prosevnu površinu stvaraju se slobodne površine i povećava verovatnoća prolaska materijala kroz sito. Broj protresanja i odbacivanja materijala u vis kao i učestalost čišćenja rešetke četkicom isti su kao i kod prosejavanja standardnim okruglim sitima. Određenu količinu materijala ne stavljati odjednom na prosevnu površinu, već u više navrata kako se ne bi opterećivala rešetka naročito kod finijih sita.

Kod ručnog i mehaničkog prosejavanja sitnozmog - praškastog materijala, od čestica sklonih lepljenju (prijanjanju) otvori sita mogu biti začepljeni, dok krupne čestice bliskih ili istih dimenzija kao i otvori sita - kritična zrna - na taj način smanjuju prosevnu površinu i usporavaju prosejavanje. Da bi smo eliminisali čestice sklone lepljenju - začepljivanju - na sito se, zajedno sa uzorkom, ubacuju i parčiči - pločice od mesinga veličine oko 10 mm (oko 30 g na svako sito). Mesingani komadi tokom prosejavanja duže ostaju u neposrednom kontaktu sa prosevnom površinom i na taj način sprečavaju aglomeraciju materijala i "čiste" rešetku. Kod prosejavanja materijala sklonog preusitnjavanju, kao pomoćno sredstvo mogu poslužiti plastične kockice. Kockice treba da imaju glatke površine da se na njima ne bi zadržavale čestice materijala. Kod prosejavanja, pri kome se koristi četkica, situ se dodaje samo čanak dok se poklopac ne stavlja. Četkice za prosejavanje treba da su široke i pljosnate, meke i s dugom dlakom. Četka se, na horizontalnom situ, drži pod ostrim uglom prema prosevnoj površini i prevlači se blago preko nje, izbegavajući da se diže prašina. Pri prevlačenju četke preko sita pod pravim uglom, njena vlakna se mogu zaglaviti u rešetku i znatno oštetiti samu prosevnu površinu.

Praškaste materijale koji su skloni naelektrisanju (elektrostatički elektricitet) jer se vrši određeno trenje tokom prosejavanja, treba prosejavati mokrim postupkom. Tečnost koja se koristi za spiranje, kako pri ručnom tako i pri mašinskom prosejavanju, ne sme da reaguje sa materijalom koji se prosejava.

Kod ručnog prosejavanja mokrim postupkom, uz spiranje sa vodom, razlikuju se dva načina izvođenja analize. Tako je moguće, po prvom postupku, na svako sito usuti odgovarajuću količinu materijala za prosejavanje i izvršiti analizu. Postupak se koristi u slučajevima kada je moguće obezbediti dovoljnu količinu reprezentativnih uzoraka. Drugi način prosejavanja, sastoji se u tome da se jedan uzorak usut na sito sa najkrupnijim otvorima, postepeno spiranjem kreće kroz čitavu seriju sita do kraja i vrši analiza. Pri mokrom prosejavanju - ispiranjem - neophodno je uzorak predhodno nakvasiti i pripremiti za analizu uz dobro homogeniziranje.

Brzina (mekaničkog) prosejavanja zavisi od učestalosti kružnih pokreta, intenziteta njihanja, vibriranja odnosno broja udara, kao i od prisustva pomoćnih sredstava - plastičnih kockica, mesinganih komada i td. Mehaničko prosejavanje zahteva znatno manje vremena u odnosu na ručno prosejavanje, manje materijala i isključuje subjektivne greške. Na sitima sa malim otvorima, postupak prosejavanja je znatno otežan ukoliko u uzorku nema krupnijih zrna materijala. Prema tome, mehaničko prosejavanje u osnovi je pogodno za tekuće rutinske analize, međutim za svaki novi spraseni (sitnozrni) materijal

preporučuje se upoređivanje rezultata mehaničkog i ručnog prosejavanja. Suvo mehaničko i ručno prosejavanje može se smatrati završenim ukoliko kroz sito prolazi samo neznatna količina materijala pri uzastopnim produženim i odgovarajući broj puta ponovljenim prosejavanjima, a da pri tome masa proseva ostaje ista.

Kod mehaničkog prosejavanja serijom sita neophodno je utvrditi, eksperimentalno, vreme trajanja prosejavanja (u zavisnosti od dimenzija otvora sita i vrste materijala koji se prosejava). Nakon završene sitovne analize svaka klasa krupnoće mora se izmeriti sa tačnošću do 0,01 g. Sumarno masa svih klasa krupnoće ne bi trebala da se razlikuje od mase polaznog uzorka za više od 2%. U suprotnom govorimo o gubitku materijala.

Preporuka je da se gubitak raspodeli na sve analizirane klase krupnoće proporcionalno njihovim masama. Kod prosejavanja se radi verodostojnosti obično izvode dve paralelne analize. Mase odgovarajućih klasa krupnoće ne bi trebale da se razlikuju više od 1 % u odnosu na ukupnu masu. Za precizna ispitivanja preporuka je da se uradi nekoliko analiza, te da se izračuna masa svake klase kao srednja aritmetička vrednost eksperimentalno dobijenih podataka.

5.2.3 ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA UZORAKA PULPE

Poznati su, pri sitovnoj analizi uzoraka u vidu pulpe, i drugačiji postupci po kojima je moguće brzo i jednostavno odrediti udeo određene klase krupnoće $>d$ ili $<d$ na sledeći način: U menzuru mase m sase se uzorak pulpe i odredi njegova zapremina V . Pri tome se može dodati još vode da bi zapremina V bila ceo lako čitljiv broj. Nakon toga, odredi se masa menzure i uzorka pulpe m_1 . Zatim se uzorak pulpe proseje na mokro kroz sito otvora d . Ostatak na situ vratimo u menzuru, dolijemo vode do zapremine V i odredimo masu menzure i ostatka na situ sa vodom m_2 .

Ukupna masa menzure i pulpe pre sejanja sastoji se iz mase čvrste faze M_1 , mase menzure m i mase tečne faze (vode) m_v .

$$m_v = \left(V - \frac{M_1}{\rho} \right) \cdot 1$$

gde je ρ - gustina čvrste faze. Prema tome imamo sledeće:

$$m_1 = M_1 + m - \left(V - \frac{M_1}{\rho} \right)$$

odakle sledi:

$$M_1 = \frac{m_1 - m - V}{1 - \frac{1}{\rho}}$$

analogno tome, posle prosejavanja, vraćanja odseva u menzuru i dolivanja vode do zapremine V , imamo da je

$$m_2 = M_2 + m + \left(V - \frac{M_2}{\rho} \right)$$

odnosno:

$$M_2 = \frac{m_2 - m - V}{1 - \frac{1}{\rho}}$$

gde je M_2 - masa odseva sita. Procentualno učešće klase krupnoće $>d$ iznosi:

$$W_d = \frac{M_2}{M_1} \cdot 100 (\%)$$

odnosno

$$W_d = \frac{m_2 - m - V}{m_1 - m - V} \cdot 100 (\%)$$

a maseni sadržaj klase krupnoće $<d$:

$$W_d = \left(1 - \frac{m_2 - m - V}{m_1 - m - V} \right) \cdot 100 (\%)$$

gde je:

- m - masa prazne menzure;
- m_1 - masa menzure i pulpe pre prosejavanja;
- m_2 - masa menzure, ostatke na situ i vode;
- V - zapremina.

5.2.4 RAD UREĐAJA ZA PROSEJAVANJE

U principu razlikujemo dva tipa uređaja za prosejavanje: kod prvih se prosejna površina kreće u ravni prosejavanja, kod drugih se prosejna površina kreće upravno na nju (vertikalna kretanja). Pored toga imamo i mogućnost da prosejne površine miruju a da se materijal koji se klasira kreće po prosevnim površinama usled strujanja vazduha koji proizvode posebni dodatni uređaji, kao što je to slučaj sa Alpininim pneumatskim sitom ili Gilsonovim soničnim sitom. U oba, gore pomenuta, glavna sistema dobijamo i različite kvalitete prosejavanja.

Svaki od pomenutih načina prosejavanja ima određene optimalne pokazatelje kao i određene razlike u kvalitetu prosejavanja, na osnovu čega ih možemo međusobno porediti. Ove razlike, pre svega, su rezultat različitih načina kretanja, materijala koji se prosejava, na prosevnoj površini.

Prvo, kretanje prosevne površine u ravni sejanja (horizontalni kružni pokreti): kod ovog sistema se zahteva da sitno zrno što više puta dođe u neposrednu blizinu sa slobodnim otvorom prosevne površine. Iz tog razloga se materijal, koji prosejavamo, mora kretati u ravni prosejavanja i mora imati dovoljno ubrzanje. Sve dok je ubrzanje nedovoljno, da bi se lako savladala sila trenja između materijala koji se prosejava i prosevne površine, nije moguć kontakt između zrna i otvora na prosevnoj površini.

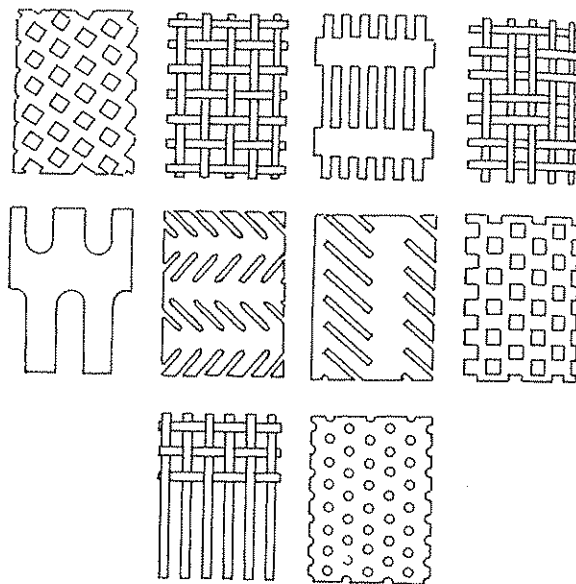
Drugo, kod uređaja sa kretanjem prosevne površine upravno na ravan prosejavanja (vertikalni pokreti) materijal se periodično odbacuje, odvaja od prosevne površine tako da je u tom slučaju broj raspoloživih otvora na prosevnoj površini proporcionalan broju prolazaka materijala koji se prosejava. Taj broj raste sa povećanjem prosevne površine.

Postavlja se pitanje koji sistem odnosno tip prosejavanja daje bolje rezultate. Odgovor na ovo pitanje može se dati eksperimentalnim radom. Pri prosejavanju, krupnkomadastog materijala, na uređajima sa vertikalnim pokretima, u odnosu na prosevnu ravan, dobijaju se bolji rezultati. Kod sitnozrnih materijala slučaj je sasvim drugačiji. (Vidi sliku 5.5)

5.2.5 LABORATORIJSKA SITA

Sva laboratorijska sita mogu biti podeljena na dve osnovne grupe: standardna laboratorijska sita i nestandardna laboratorijska sita. Različite vrste prosevnih površina kod laboratorijskih sita dati su na slici 5.8.

Nestandardna laboratorijska sita se koriste za određivanje granulometrijskog sastava, odnosno klasiranje krupno-komadastih sirovina i sirovina sa velikim rasponom krupnoće. To su sita kvadratnog ili pravougaonog oblika, sa drvenim ramom, sa površinom za prosejavanje od perforiranog lima ili pletenom čeličnom mrežom. Sita sa perforiranim limom imaju okrugle otvore za prosejavanje, ređe kvadratne ili pravougaone. Okrugli otvori mogu biti u paralelnim redovima ili u naizmeničnom poretku, od kojih ova druga imaju veću korisnu prosevnu površinu i do 15 % u odnosu na paralelan raspored otvora.



Sl. 5.8 Vrste prosevnih površina kod laboratorijskih sita.

Nestandardna laboratorijska sita imaju sledeće dimenzije otvora za prosejavanje: 200, 150, 130, 100, 80, 75, 60, 50, 40, 30, 25, 20, 15, 10, 5, 3, 1,5, 1, i 0,5 mm.

Standardna laboratorijska sita se koriste za klasiranje sitnozrnog materijala suvim ili mokrim postupkom. Sita su okrugla i izrađena od nerđajućeg materijala. Specijalni okrugli ram, koji nosi prosevnu površinu, izrađen je tako da omogućava sitima da se postave u slog i materijal istovremeno prosejava kroz više sita. Mnoge zemlje u svetu imaju svoja standardna laboratorijska sita, od kojih ćemo pomenuti najznačajnija. U tabelici 5.3 prikazan je uporedni pregled četiri standardna sistema laboratorijskih sita.

U standardna laboratorijska sita svakako treba ubrojati i takozvana mikrosita, sa elektroforetski perforiranim limom, kao prosevnom površinom. Veličine otvora su 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 i 40 μ m, a mogu biti sa metalnim standardnim ramom od 200 mm ili manja od 110 mm. Prosejavanje je mokrim postupkom u ultrazvučnoj kadici. Rad sa ovim sitima biće obrađen u posebnoj lekciji ove knjige.

Tablica 5.3 Uporedni pregled standardnih laboratorijskih sita

TYLER		DIN		AFNOR		GOST
Mesh	Otvor u mm	Broj sita	Otvor u mm	Broj sita	Otvor u mm	Otvor u mm
3 #	6,680			38	5,00	—
4 #	4,699			—	—	—
5 #	3,962		4,0	37	4,0	—
6 #	3,327		—	—	—	—
—	—		3,15	36	3,15	—
7 #	2,794		—	—	—	—
—	—		2,5	35	2,5	2,5
8 #	2,362		—	—	—	—
9 #	1,981		2,00✓	34	2,00	2,0
10 #	1,651		—	—	—	—
—	—		1,60	33	1,60	1,6
12 #	1,397	4	1,50	—	—	—
14 #	1,168	5	1,25✓	32	1,25	1,25
16 #	0,981	6	1,00✓	31	1,00	1,00
—	—		—	—	—	0,90
20 #	0,833		0,8	30	0,8	0,80
24 #	0,701	8	0,75	—	—	0,70
—	—		0,63	29	0,63	0,63
28 #	0,589	10	0,60	—	—	0,56
32 #	0,495	12	0,50✓	28	0,5	0,50
—	—	14	0,43	—	—	0,45
35 #	0,417	16	0,4✓	27	0,4	0,40
42 #	0,351		—	—	—	0,355
—	—		0,315✓	26	0,315	0,315
48 #	0,295	20	0,30	—	—	0,28
60 #	0,246	24	0,25✓	25	0,25	0,25
—	—		—	—	—	0,225
65 #	0,208	30	0,20✓	24	0,20	0,20
80 #	0,175		—	—	—	0,18
—	—		0,160✓	23	0,16	0,16
100 #	0,147	40	0,150	—	—	0,14
115 #	0,124		0,125✓	22	0,125	0,125
—	—	50	0,120	—	—	0,112
150 #	0,104	60	0,100✓	21	0,100	1,000
170 #	0,088	70	0,090✓	—	—	0,090
—	—		0,080✓	20	0,080	0,080
200 #	0,074		0,071✓	—	—	0,071
250 #	0,063		0,063✓	19	0,063	0,063
—	—		0,056	—	—	0,056
270 #	0,053		0,050	18	0,050	0,050
325 #	0,044		0,045	—	—	0,045
400 #	0,038		0,040	17	0,040	0,040

Osnovna serija sita — označena masnim slovima

Američka sita Tyler (Tyler's Testing Sieves) veoma poznata serija sita u svetu i kod nas. Sita imaju ram prečnika 200 mm i dubine 50 mm; izgrađena su od mesinga, a prosečne površine od specijalnih legura. Serija bazira na geometrijskoj progresiji modula $\sqrt{2}=1,414$ i dopunjena je sitima sa modulom $\sqrt[4]{2}=1,189$. Prva serija naziva se osnovnom, a druga dopunskom serijom. Za osnovu sistema uzeto je sito sa oznakom 200 # (mesh na engleskom označava petlju), što istovremeno kazuje da se na jednom dužnom inču (1 inch = 25,4 mm) nalazi

200 žica i 200 otvora. Veličina jediničnog otvora je 0,074 mm a debljina žice 0,053 mm. Veličina susednog sita, sa većim ili manjim otvorom od 200 #, dobija se množenjem ili deljenjem veličine otvora osnovnog sita modulom $\sqrt{2}$ ili $\sqrt[4]{2}$. Na primer: sito veće od 200 # ima otvor $0,074 \times 1,414 = 0,104$ mm, što odgovara situ u osnovnoj seriji sa oznakom 150 #; ili $0,074 \times 1,189 = 0,088$ mm, što odgovara situ 170 # u dopunskoj seriji. Sito sa manjim otvorom od 200 #, u osnovnoj seriji ima otvor $0,074 : 1,414 = 0,053$ mm i odgovara situ 270 # ili

u dopunskoj seriji $0,074 : 1,189 = 0,062$ mm i odgovara situ 230 #. U predhodnoj tablici 5.3 prikazane su kompletno, osnovna i dopunska serija Tyler-ovih sita.

Engleska sita I.M.M. (Institut of Mining and Metallurgy) je serija koja bazira na principu izjednačenja veličine otvora za prosejavanje sa debljinom žice u mreži. Na primer: sito 200 # ima na jednom dužnom inču 200 otvora i 200 žica, tako da je veličina jednog otvora jednaka debljini žice a oni iznose 0,0635 mm. Posmatrano u odnosu na Tyler-ovu seriju ova sita su jednostavnija ali sa porastom otvora sita proporcionalno se smanjuje i korisna prosejna površina. U Engleskoj se više koriste **B.S.I.** sita (British Standard Institution), koja su bliska Tyler-ovoj seriji.

Standardna sita I.S.A. (International Standard Association). Serija je izrađena po preporuci međunarodne organizacije za standarde, a bazira na principu metričkog sistema, sa normalnim redom opadanja brojeva, što omogućava geometrijska progresija $\sqrt[3]{10} = 1,259$. I ova osnovna serija sita ima odgovarajuću dopunsku.

Nemačka sita DIN (Deutsche Industrie Normen) imaju oznake u brojevima, koji kazuju koliki je broj otvora po kvadratnom santimetru. Veličina otvora se iskazuje u milimetrima. Sita ove serije se u laboratorijama za PMS češće koriste kod klasiranja nemetalnih mineralnih sirovina i ugljeva.

Ruska sita GOST, u laboratorijama na teritoriji bivšeg SSSR mogu se naći u upotrebi standardna laboratorijska sita koja odgovaraju različitim modulima. Tako imamo niz sita sa oznakama: R5 odnosno modulom $\sqrt[3]{10} = 1,5849 \approx 1,6$; R10 odnosno modulom $\sqrt[3]{10} = 1,2589 \approx 1,25$; R20 odnosno modulom $\sqrt[3]{10} = 1,1220 \approx 1,12$; R40, odnosno modulom, $\sqrt[3]{10} = 1,0593 \approx 1,06$. Usaglašavanjem sa međunarodnim standardima ISO danas nalazimo serije sa oznakama $R \frac{20}{3} = 1,41 \approx \sqrt{2}$ odnosno $R \frac{40}{3} = 1,19 \approx \sqrt{2}$.

Pored ovih serija, kod nas ređe nalazimo i sita kao što su:

Francuska sita AFNOR

Holandska sita HCNH ili

Jugoslovenska sita JUS (takozvana graevinska)

5.2.6 EFEKAT PROSEJAVANJA

Efekat prosejavanja zavisi uglavnom od sadržaja vlage, oblika zrna, krupnoće materijala i kritičnih zrna.

Vlažnost. Vlažan materijal se teže prosejava. Što su zrna sitnija, sve je veća površina i veća količina vode koju materijal veže za sebe u vidu opne na površinama zrna. Sitnija zrna lako se međusobno slepljuju i sa krupnijim zrnima obrazujući pri tome agregate, koji ostaju u krupnijim klasama i tako snižavaju efekat prosejavanja. Smatra se da sadržaj spoljašnje vlage u količini preko 8 % znatno snižava efekat prosejavanja.

Oblik zrna takođe ima uticaja na efikasnost prosejavanja. Komadi zrna sferičnih oblika znatno lakše prolaze kroz otvore sita, nego li tankopločasta i igličasta zrna.

Krupnoća. Zrna čija je krupnoća znatno manja od otvora sita, lako prolaze kroz sito; veoma krupna zrna nemaju bitnog uticaja na prosejavanje. Zrna čije su veličine bliske otvoru sita - kritična zrna, imaju bitnog uti-

caja na kvalitet prosejavanja; zatvaraju otvore sita i ukoliko ih je više u uzorku, efekat prosejavanja se smanjuje.

Na tačnost sitovne analize mogu da utiču i drugi faktori, kao preciznost uzimanja srednjeg uzorka, pedantnost izvođenja analiza, pohabanost mreže sita i kolebanja u otvorima mreže sita. Ako se mnogi od navedenih faktora isključe u toku prosejavanja, onda tačnost sitovne analize je u granicama 0,5 - 1,0 %.

5.2.7 NAČIN PRIKAZIVANJA GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA

Klasa krupnoće. Klasom krupnoće naziva se deo materijala koji je dobijen kao ostatak na situ prilikom prosejavanja, ograničen uskim intervalom krupnoće. Na primer: klasa krupnoće -150+200#, (-0,104+0,074 mm).

Granulometrijski sastav. Granulometrijskim sastavom se prikazuje raspodela zrna (komada) po klasama krupnoće polaznog uzorka. Granulometrijski sastav možemo prikazati: tablično, grafički i analitički.

5.2.8 TABLIČNO PRIKAZIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA

Proizvodi dobijeni prosejavanjem mere se, a mase određenih klasa izražavaju se u masenim jedinicama (kg; g) i unose u tablicu. Zbir ovih masa daje polaznu masu uzorka. Na osnovu dobijenih podataka izračunava se maseni udeo svake klase (u %) prema

$$M_n = M'_n \times 100 / \Sigma M_n$$

gde su:

M_n - maseni udeo klase, (%);

M'_n - maseni ostatak na situ, (kg; g);

ΣM_n - ukupna masa polaznog uzorka, (kg; g).

Zbir masenih udela klasa treba da je ravan 100 %. Iz dobijenih podataka obrazuju se dve kolone - zbirni maseni udeli odseva ili zbirne mase naviše i zbirni maseni udeli proseva ili zbirne mase naniže, dodavanjem ili oduzimanjem po jedan odsev više. Ovi podaci omogućavaju očitavanje masenog udela odseva i proseva za određeni granični prečnik zrna. Granulometrijski sastav se često prikazuje samo zbirnim masenim udelom naniže, ukazujući na masu materijala krupnijeg od datog otvora sita, tako da će zbirna masa sitnijeg materijala biti jednaka vrednosti oduzete od 100 %.

Tablični način prikazivanja granulometrijskog sastava prikazan je u narednoj tablici 5.4. Klasa krupnoće, kao deo materijala koji je dobijen kao ostatak na situ prilikom prosejavanja, ograničen uskim intervalom krupnoće, označava se veličinom otvora sita sa znakom "plus" (+2,362). Klasa krupnoće koja prolazi kroz dato sito označava se veličinom otvora sita sa znakom "minus" (-3,327). Klasa krupnoće između dva susedna sita označava se veličinom otvora oba sita. Na primer: klasa krupnoće -3,327 +2,362 mm prošla je kroz sito otvora 3,327 mm, a zadržala se na situ otvora 2,362 mm. Zbir masenih udela pojedinačnih, individualnih klasa krupnoće treba da je ravan 100 %. Iz dobijenih podataka obrazuju se dalje dve kolone: kolona sa zbirnim masenim udelom odseva ili zbirne mase naviše, koja pokazuje šta bi ostalo na datom situ ako bi ono bilo prvo u seriji. Kolona sa zbirnim masenim udelom proseva ili zbi-

Tablica 5.4. Granulometrijski sastav izdrobljene sirovine

Klase krupnoće		Parcijalni udeo		Kumulativni, sumarni udeo	
# po Tyler-u	mm	grama	%	Odsev, Po plusu, (%)	Prosev, Po minusu (%)
- 4 + 6	-4,691+3,327	70,7	7,1	7,1	100,0
- 6 + 8	-3,327+2,362	54,0	5,4	12,5	92,9
- 8 + 10	-2,362+1,651	89,3	9,0	21,5	87,5
- 10 + 14	-1,651+1,168	133,3	13,4	34,9	78,5
- 14 + 20	-1,168+0,833	110,5	11,1	46,0	65,1
- 20 + 28	-0,833+0,589	83,1	8,4	54,4	54,0
- 28 + 35	-0,589+0,417	114,8	11,6	66,0	45,6
- 35 + 48	-0,417+0,295	63,8	6,4	72,4	34,0
- 48 + 65	-0,295+0,208	77,9	7,8	80,2	27,6
- 65 + 100	-0,208+0,147	54,0	5,4	85,6	19,8
- 100 + 150	-0,147+0,104	34,2	3,4	89,0	14,4
- 150 + 200	-0,104+0,074	35,8	3,6	92,6	11,0
- 200	-0,074+0,000	73,6	7,4	100,0	7,4
U k u p n o:		995,0	100,0	-	-

rne mase naniže pokazuje šta bi prošlo kroz dató sito ako bi ono bilo poslednje u seriji. Podaci se dobijaju dodavanjem ili oduzimanjem po jednu klasu krupnoće. Ovi podaci omogućavaju očitavanje masenog udela odseva i proseva za određeni granični prečnik zrna. Na primer: ako bi prvo sito u seriji bilo sito otvora 1,651 mm onda bi na njemu ostalo $7,1+5,4+9,0 = 21,5\%$, odnosno kroz njega bi prošlo $78,5\%$. Ako bi poslednje sito u seriji bilo sito otvora 0,147 mm, onda bi kroz njega prošlo: $7,4+3,6+3,4 = 14,4\%$.

5.2.9 GRAFIČKO PRIKAZIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA

Rezultati granulometrijskog sastava mogu se prikazati grafički (Sl.5.9). Na osu apscise nanose se, u izabranoj razmeri, veličine zrna u mm ili μm (ili veličine otvora sita), a na osu ordinate pojedinačne i zbirne masene udele klasa. Konstruišu se tri krive - direktna kriva (dobijena iz histograma distribucije veličine zrna po klasama krupnoće) i dve kumulativne krive granulometrijskog sastava (odseva i proseva). Direktna kriva granulometrijskog sastava konstruiše se prema podacima o masenom udelu pojedinih klasa krupnoće u uzorku. Iz tačaka koje odgovaraju srednjoj krupnoći klasa ili graničnoj krupnoći klasa povlače se ordinate čije veličine odgovaraju masenom udelu te klase. (Na ovaj način dobijen je histogram distribucije, dok se spajanjem pomenutih srednjih vrednosti dobija poligona kriva učestalosti pojedinih klasa u analiziranom uzorku, na osnovu koga se konstruiše direktna kriva granulometrijskog sastava).

Direktna kriva granulometrijskog sastava omogućava očitavanje masenog udela međuklasa, bez dopunskog prosejavanja, interpolacijom. Iz tačke na osi apscise, za traženu krupnoću, povući normalu do presecanja sa krivom, iz dobijene tačke povući pravu paralelnu osi apscise, njeno presecanje sa osom ordinate određuje maseni udeo klase.

Kumulativne krive granulometrijskog sastava konstruišu se shodno podacima o masenom udelu odseva i proseva, pri datim krupnoćama klasa. Prema obliku kumulativne krive odseva i stepenu njene zakrivljenosti, može da se oceni manje ili veće učešće krupnijih odno-

sno sitnijih klasa i ravnomernost granulometrijskog sastava. Ako se kriva približava pravoj liniji, raspodela zrna u uzorku po krupnoći je ravnomerna; konkavna kriva ukazuje na veće prisustvo sitnijih, a konveksna krupnijih klasa u uzorku.

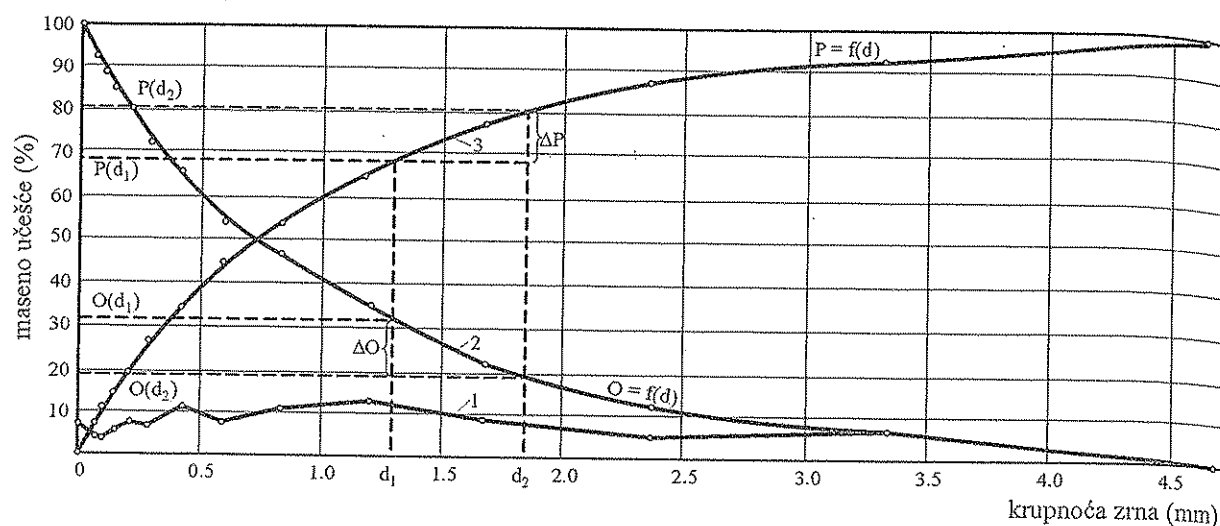
Kumulativne krive granulometrijskog sastava omogućavaju očitavanje masenih udela odseva i proseva za bilo koju graničnu krupnoću zrna, bez dopunskog prosejavanja. Za datu krupnoću, naći na apscisi tačku i iz nje povući vertikalu do presecanja sa krivama; iz tačaka presecanja povući prave do ordinate i očitati masene udele odseva i proseva, odnosno, krupnijih i sitnijih zrna od date granične krupnoće.

Kod klasiranja uzoraka standardnim sitima, u domenu sitnijih zrna, pojedini delovi krivih veoma su nepregledni. U tom slučaju na osu apscise nanose se logaritamske vrednosti prečnika zrna (ili veličine otvora sita), a na osu ordinate pojedinačne i zbirne mase klasa koje se dobijaju prosejavanjem. Dobijene krive granulometrijskog sastava su semilogaritamske. Na isti način grafički prikaz granulometrijskog sastava može biti i u bilogaritamskoj podeli.

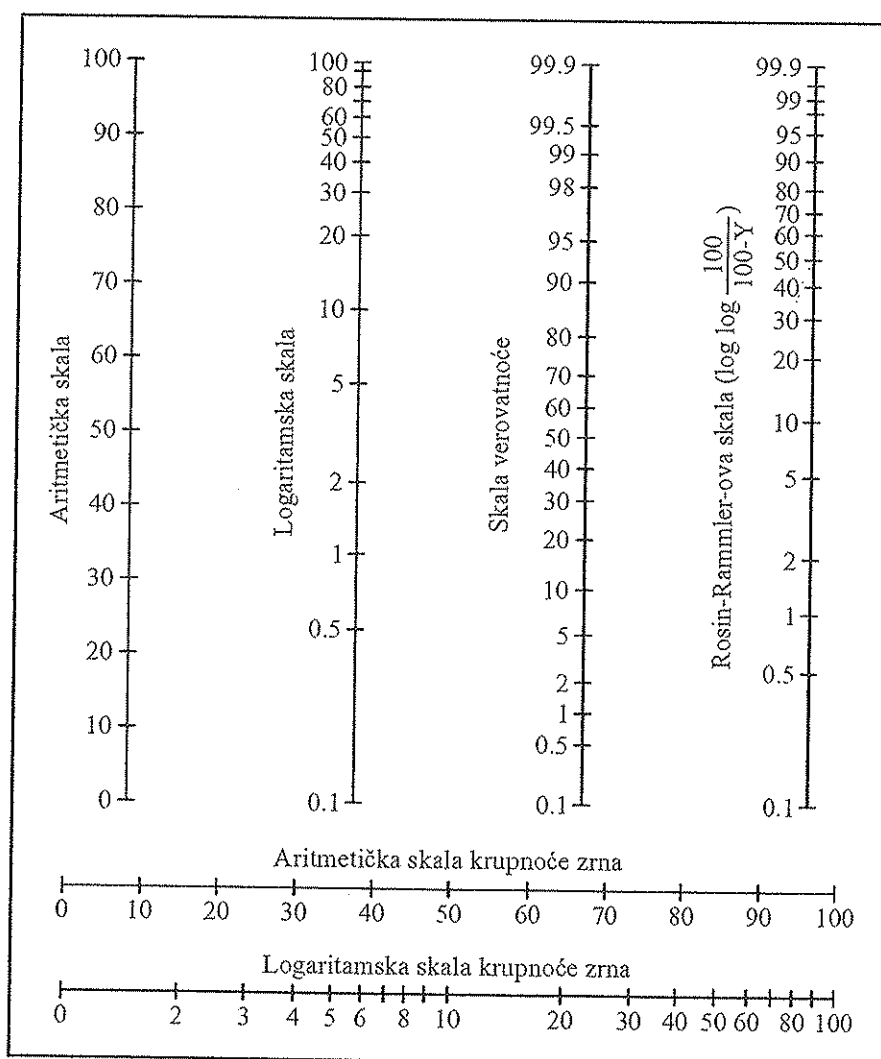
Krive granulometrijskog sastava treba završiti sa udelom najsitnije klase krupnoće. S tim da dovođenje krive do nulte tačke nije moguće, jer je logaritam te vrednosti $-\infty$.

Preimućstvo polulogaritamskog i logaritamskog koordinatnog sistema sastoji se u tome, što se rastojanja među susednim vrednostima veličine otvora sita u oblasti sitnih zrna povećavaju, a u oblasti krupnijih klasa smanjuju. To olakšava ucertavanje karakteristike i pravilno očitavanje. Logaritamske kumulativne karakteristike krupnoće ucertavaju se u koordinatnom sistemu ($\log d$; $\log O$ ili $\log P$). Kod polulogaritamskog i logaritamskog koordinatnog sistema koordinatni početak pomena se na X-osi u tačku koja odgovara 1 μm , 1 mm ili 1 cm, budući da je $\log 1 = 0$ (Sl.5.10). Samim tim, kumulativne karakteristike krupnoće ne povlače se do tačaka na ordinati koje odgovaraju odsevu $O = 100\%$, odnosno prosevu $P = 0\%$.

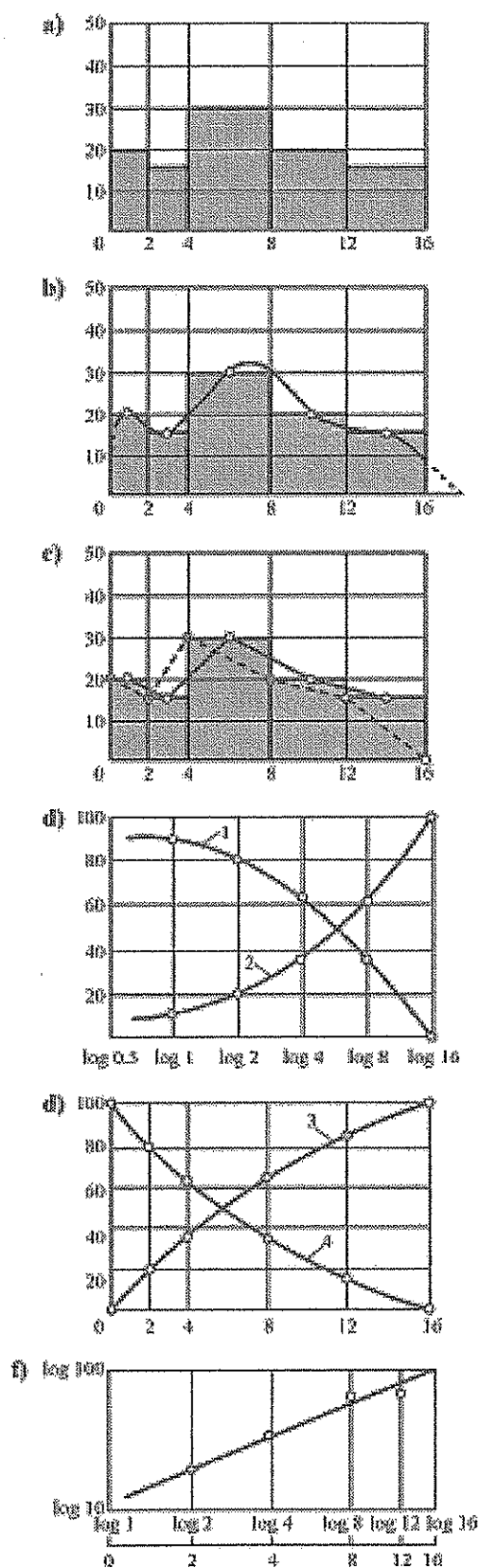
Mogućnosti prikazivanja granulometrijskog sastava neke sirovine u različitim vidovima ilustrovane su na slici 5.11.



Sl. 5.9 Grafički prikaz granulometrijskog sastava sirovine: 1. Direktna kriva (parcijalne karakteristike krupnoće); 2. Kumulativna kriva odseva (karakteristike krupnoće po plusu); 3. Kumulativna kriva proseva (karakteristike krupnoće po minusu)



Sl. 5.10 Ilustracija tipova osa kod različitih grafičkih prikaza granulometrijskog sastava sirovina: aritmetička skala; logaritamska skala; skala verovatnoće; Rosin-Rammler-ova log log skala; odnosno milimetarska podela (aritmetička skala) krupnoće mineralnih zrna i logaritamska skala krupnoće zrna minerala.



Sl. 5.11 Načini prikazivanja granulometrijskog sastava sirovine: a-histogram raspodele zrna po krupnoći; b-direktna kriva granulometrijskog sastava; c-poligona kriva - srednjih prečnih klasa ili preko graničnih prečnih; d-kumulativne krive odseva i proseva u logaritamskoj podeli na apscisi; e-kumulativne krive odseva i proseva u bilogaritamskoj podeli na skalama; f-bilogaritamske skale sa log log skalom.

5.2.10 ANALITIČKO PRIKAZIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA

Predložen je čitav niz zavisnosti $R=f(d)$ i $D=f(d)$ (odseva i proseva). Najveću primenu našli su: jednačina Gaudin-Andreev-Schuhmann-a i jednačina Rosin-Rammler-a.

□ Jednačina Gaudin-Andreev-Schuhmann-a predstavlja jednačinu kumulativne karakteristike krupnoće "po minusu", odnosno karakteristike proseva:

$$D = \left[\frac{d}{d_{\max}} \right]^m$$

gde je:

D- kumulativni prosev sita (%);

d - veličina otvora sita (mm);

$d_{\max}$ - gornja granična krupnoća uzorka (veličina otvora sita kroz koje prolazi sav uzorak - D = 100%), (mm);

m - parametar koji zavisi od granulometrijskog sastava uzorka.

Logaritmovanjem gornje jednačine dobijamo:

$$\log D = 2 + m \cdot \log d - m \cdot \log d_{\max}$$

odnosno

$$\log D = m \cdot \log d + A$$

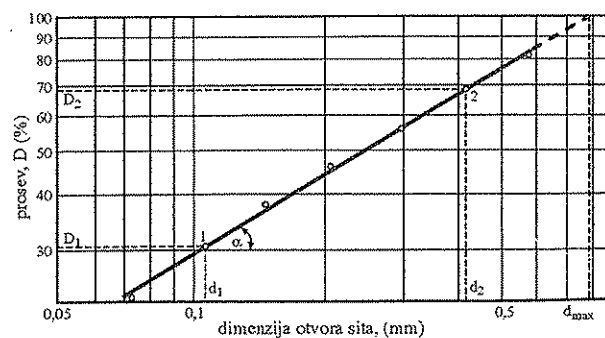
gde je

$$A = 2 - m \cdot \log d_{\max}$$

Ovaj izraz predstavlja jednačinu prave linije u logaritamskom koordinatnom sistemu ($\log d$; $\log D$), sa koeficijentom pravca m ($\tan \alpha$).

Ukoliko se granulometrijski sastav sirovine može opisati gornjom jednačinom, onda logaritamska karakteristika krupnoće "po minusu" (kumulativna kriva odseva), predstavlja manje-više pravu liniju. Parametre $d_{\max}$ i m možemo odrediti grafičkim ili analitičkim postupkom.

Grafički, $d_{\max}$ nalazimo u preseku kumulativne karakteristike krupnoće "po minusu" (proseva) sa ordinatom D=100%. (Sl.5.12) Parametar m predstavlja tangens ugla naklona prave prema pozitivnom smeru ose apscise. Ako je za obe koordinatne ose usvojena ista razmera, onda se merenjem ugla naklona nalazi m kao: $m = \tan \alpha$.



Sl. 5.12 Logaritamske karakteristike krupnoće (Magdalinić, 1985.)

Analitički, parametre $d_{\max}$ i m nalazimo na sledeći način: na pravoj, prikazanoj na slici izaberemo dve tačke (1 i 2), po mogućnosti što udaljenije jedna od druge. Zatim napišemo jednačine prave kroz te tačke:

$$\log D_1 = 2 + m \cdot \log d_1 - m \cdot \log d_{\max}$$

$$\log D_2 = 2 + m \cdot \log d_2 - m \cdot \log d_{\max}$$

Iz poslednje jednačine sledi da je:

$$\log d_{\max} = \frac{2 + m \cdot \log d_2 - \log D_2}{m}$$

Zamenom vrednosti za $\log d_{\max}$ iz poslednje jednačine u prvu jednačinu dobijamo parametar m :

$$m = \frac{\log D_2 - \log D_1}{\log d_2 - \log d_1}$$

* Primer: Za logaritamsku karakteristiku krupnoće "po minusu" prikazanu na slici 5.12. za tačke 1 i 2 je:

$$d_1 = 0,104 \text{ mm}; D_1 = 30,0 \%$$

$$d_2 = 0,417 \text{ mm}; D_2 = 68,5 \%$$

A iz poslednje jednačine je:

$$m = \frac{\log D_2 - \log D_1}{\log d_2 - \log d_1} = \frac{\log 68,5 - \log 30,0}{\log 0,417 - \log 0,104} = -0,1044$$

odnosno:

$$d_{\max} = 10^{-0,1044} = 0,786 \text{ mm}$$

Gaudin-Andreev-Schuhman-ova jednačina granulometrijskog sastava prikazanog tablicom 5.5. i slikom 5.12. glasi:

$$D = 100 \cdot \left[\frac{d}{0,786} \right]^{-0,595}$$

Jednačina pruža mogućnost da se izračuna prosek za bilo koju veličinu otvora sita. Učešće bilo koje klase krupnoće $-d_i + d_{i-1}$ nalazimo kao razliku:

$$W_{-d_i + d_{i-1}} = D_i - D_{i-1}$$

Tablica 5.5 Granulometrijski sastav izmlevene rude

Klase krupnoće u mm	Maseni udeo $M, \%$	Maseni udeo proseva $\%$
-0,833+0,589	19,30	100,00
-0,589+0,417	12,20	80,70
-0,417+0,295	12,70	68,50
-0,295+0,208	10,00	55,80
-0,208+0,147	8,00	45,80
-0,147+0,104	7,80	37,80
-0,104+0,074	6,40	30,00
-0,074+0,000	23,60	23,60
Ulaz:	100,00	—

*Primer. Koristeći se jednačinom (34) naći učešće sledećih klase krupnoće: +0,5 mm; -0,5+0,3 mm; -0,3+0,1 mm i -0,1 mm.

$$D_{0,5} = 76,4 \%; D_{0,3} = 56,4 \%; D_{0,1} = 29,3 \%$$

Shodno jednačini (35), učešće traženih klase krupnoće iznosi:

$$W_{-0,786+0,589} = 23,6 \%; W_{-0,5+0,3} = 20,0 \%;$$

$$W_{-0,3+0,1} = 27,1 \%; W_{-0,1} = 29,3 \%$$

Zbir učešća svih klase mora da iznosi 100% (23,6+20,0+27,1+29,3=100 %).

Jednačina Gaudin-Andreev-Schuhmann-a je primenljiva za uzorke užeg raspona krupnoće (proizvodi mlevenja i klasiranja).

□ Jednačina Rosin-Rammler-a. Po ovoj jednačini kumulativni odsev R na situ otvora d definisan je sledećom eksponencijalnom jednačinom:

$$R = 100 \cdot e^{-\left(\frac{d}{d'}\right)^n}$$

gde je:

R - kumulativni odsev (%);

e - osnova prirodnog logaritma ($e=2,718$);

d - veličina otvora sita (mm);

d' i n - parametri koji zavise od granulometrijskog sastava uzorka.

Ako je $d=d'$ onda iz gornje jednačine sledi da je:

$$R = \frac{100}{e} = 36,79\%$$

Prema tome, parametar d' karakteriše krupnoću uzorka, i predstavlja veličinu otvora sita na kome je $R=36,79\%$. Jednačinu možemo napisati i u obliku:

$$\frac{100}{R} = e^{\left(\frac{d}{d'}\right)^n}$$

Dvostrukim logaritmovanjem jednačine dobijamo:

$$\log \cdot \log \left(\frac{100}{R} \right) = n \cdot \log d - n \cdot \log d' + \log \cdot \log e$$

Ova jednačina, u koordinatnom sistemu ($\log d$; $\log \log (100/R)$), predstavlja jednačinu prave linije sa koeficijentom pravca n . Ako granulometrijski sastav uzorka (Tablica 5.4) ucrtamo u koordinatnom sistemu $\log d - \log \log (100/R)$ i pri tome dobijemo pravu liniju, onda se dati granulometrijski sastav može opisati Rosin-Rammler-ovom jednačinom. Na ovaj način se određuju parametri d' i n (Slika 5.13).

5.2.11 STATISTIČKA OBRADA PODATAKA GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA MATERIJALA

Određivanjem srednjeg prečnika zrna uzorka, u kojem se nalaze zrna različite krupnoće, kao i koeficijenta varijacije (kolebanja) krupnoće zrna, može se sa sigurnošću vršiti poređenje karakteristika krupnoće dva ili više uzoraka, prikupljenih radi kontrole pojedinih uređaja za usitnjavanje (u procesu drobljenja i mlevenja), rad uređaja za klasiranje, kontrola pojedinih tehnoloških faza i dr. Podaci sitovne analize su osnova za ova izračunavanja (Tablica 5.6).

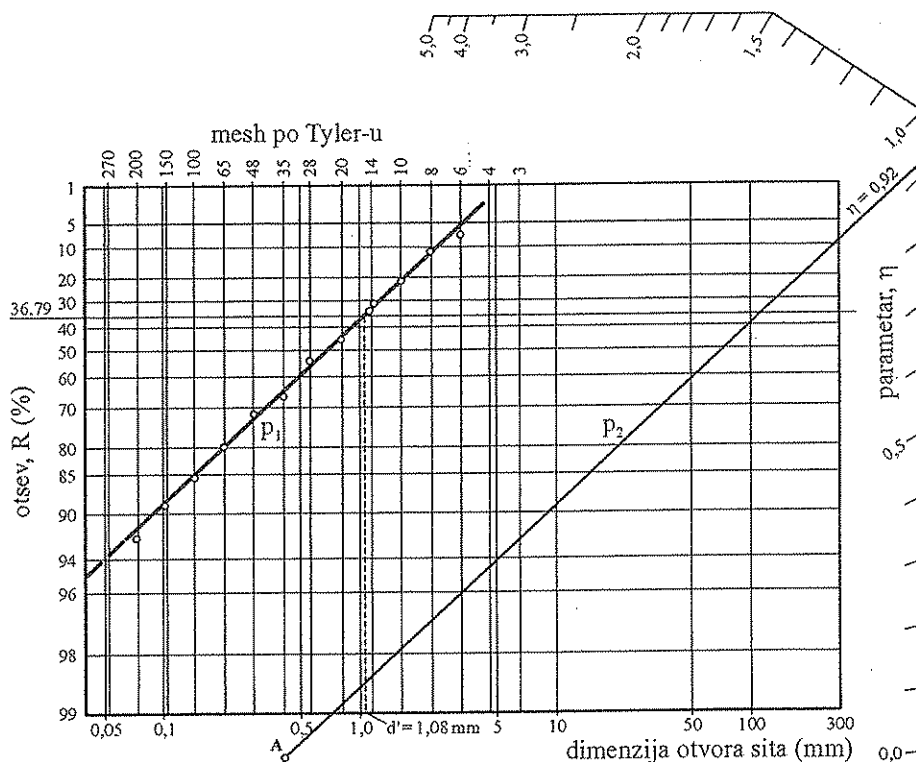
Standardna devijacija (krupnoće zrna u smeši uzorka) σ_d , izražena je u istim jedinicama mere u kojima je izraženo i obeležje, odnosno aritmetička sredina. Relativna mera disperzije koja se temelji na standardnoj devijaciji jeste koeficijent varijacije K_v . Koeficijent varijacije teži nuli kada su maseni udeli pojedinačnih klase isti (sve klase isto zastupljene).

Srednji prečnik određene klase krupnoće može da se izračuna na više načina:

$$\bar{d}_{AR} = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

$$\bar{d}_{GM} = \sqrt{d_1 \cdot d_2}$$

$$\bar{d}_{HAR} = \frac{2 \cdot d_1 \cdot d_2}{(d_1 + d_2)}$$



Sl.5.13 Rosin-Rammler-ov dijagram karakteristika krupnoće (Magdalinović, 1985)

Tablica 5.6. Statistička obrada podataka granulometrijskog sastava materijala

Klase krupnoće u mm	M_n , %	Srednji prečnik klase $\bar{d}_n$	$M_n \times \bar{d}_n$	$D_n - \bar{d}$	$(D_n - \bar{d})^2 \times M_n$
-1,651+1,168	4,60	1,409	6,481	-0,957	4,210
-1,168+0,833	3,84	1,000	3,840	-0,548	1,153
-0,833+0,589	17,28	0,711	12,286	-0,259	1,159
-0,589+0,417	18,04	0,503	9,074	-0,051	0,047
-0,417+0,295	18,88	0,356	6,721	+0,096	0,174
-0,295+0,208	15,34	0,252	3,866	0,204	0,638
-0,208+0,147	10,22	0,178	1,819	0,274	0,767
-0,147+0,104	7,28	0,126	0,917	0,326	0,774
-0,104+0,074	1,09	0,089	0,097	0,363	0,144
-0,074+0,000	3,43	0,037	0,127	0,415	0,591
U l a z:	100,0	$\bar{d} = 0,452$	45,229	-	9,657

Srednji prečnik krupnoće za ceo uzorak klasirane sirovine izračunat je prema obrascu

$$D_{sr} = \frac{\sum M_n \cdot \bar{d}_n}{\sum M_n} = \frac{45,229}{100} = 0,452 \text{ mm}$$

Standardna devijacija izračunata je prema

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum (\bar{d}_n - D_{sr})^2 / M_n}{\sum M_n}} = \sqrt{\frac{9,657}{100}} = 0,311$$

Dok je koeficijent varijacije izračunat prema

$$K_v = \frac{\sigma_d}{D_{sr}} = \frac{0,311}{0,452} = 0,6875$$

ili $K_v = 68,75 \%$.

5.2.12 ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA SMEŠE DVA ILI VIŠE PROIZVODA (primer iz industrijskog procesa)

Nije redak slučaj da se u tehnološkom procesu mešaju dva ili više proizvoda čije granulometrijske sastave i učešća u smeši znamo. Neka smešu mase m čine proizvodi čija učešća u smeši iznose: $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$ i neka sadržaj j -te klase krupnoće u pojedinim proizvodima iznosi $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$. Masa j -te klase krupnoće u smeši mora biti jednaka zbiru masa j -te klase krupnoće u pojedinim proizvodima:

$$m M_j / 100 = m_1 M_j / 100 + m_2 M_j / 100 + \dots + m_n M_j / 100$$

odakle sledi da je sadržaj j -te klase krupnoće u smeši jednak:

$$M = (m_1 M_1 + m_2 M_2 + m_3 M_3 + \dots + m_n M_n) / m$$

gde je: $m = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n$.

U gornjoj jednačini, učešće pojedinih proizvoda može biti dato u masenim jedinicama, delovima jedinica ili u procentima.

❖ **Primer.** Izračunati granulometrijski sastav smeše proizvoda A i B čiji su granulometrijski sastavi dati u kolonama 2 i 3 tablice 5.7. Maseni protok proizvoda A iznosi 100 t/h, a proizvoda B iznosi 150 t/h. Postupak izračunavanja prikazan je u koloni 4 tablice 5.7.

5.2.13 GRAFIČKO ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA SMEŠE DVA PROIZVODA

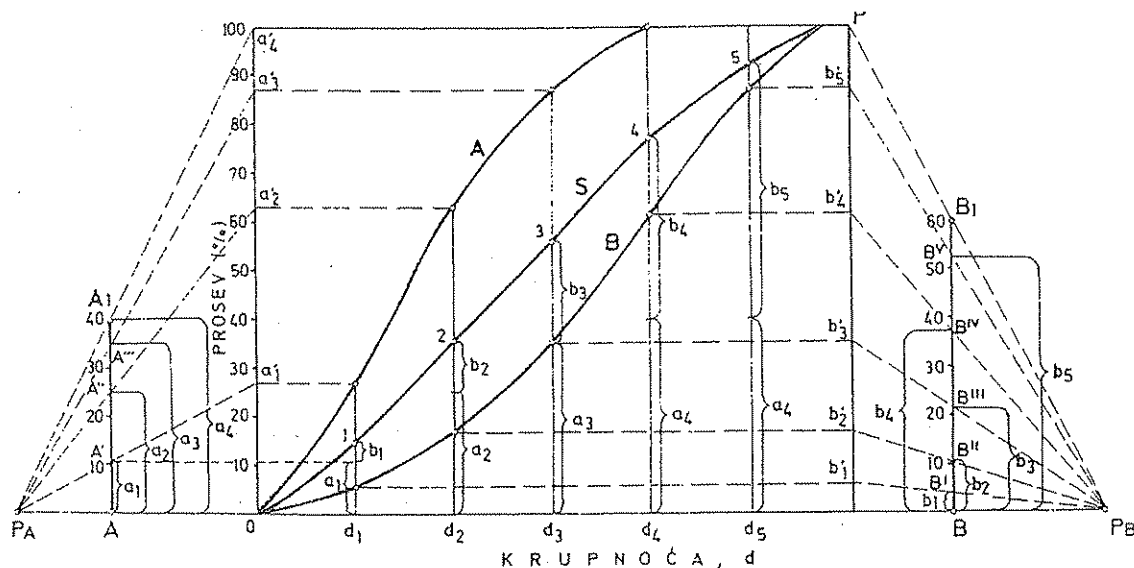
Neka se proizvodi A i B, čije su karakteristike krupnoće prikazane krivama A i B na Sl.5.14, mešaju u odnosu A:B = 40:60 %. U tom slučaju se za grafičko određivanje granulometrijskog sastava smeše ovih proizvoda postupka na sledeći način: sa leve strane dijagrama, na proizvoljnom rastojanju od ordinatne ose, povuče se prava AA₁, čija dužina odgovara učešću proizvoda A u smeši (u našem slučaju 40 %). Iz ordinate 100 % na dijagramu povuče se prava kroz tačku A₁ do preseka sa negativnim delom apscisne ose i u preseku dobije pol PA. Analogno tome, sa desne strane, na proizvoljnom rastojanju povuče se prava BB₁, čija dužina odgovara učešću proizvoda B u smeši (u našem slučaju 60 %). Po-

vlačenjem prave kroz tačke P i B₁ do preseka sa pozitivnim delom apscisne ose dobijamo pol PB. Za određivanje učešća klase -d₁+0 u smeši, iz tačke d₁ na apscisi vučemo normalu do preseka sa krivama A i B, iz tačke preseka normale sa krivom A, vučemo paralelu sa apscisnom osom od tačke a₁' preseka sa ordinatnom osom. Tačku a₁' spajamo sa polom PA i u preseku prave a₁'PA sa pravom AA₁ dobijamo tačku A'. Duž AA', koja je predstavljena veličinom a₁, na Sl.5.14, daje nam učešće klase -d₁+0 u smeši S, koja potiče iz proizvoda A. Iz tačke preseka normale d₁ sa krivom B vučemo paralelu sa apscisnom osom do tačke b₁', na desnoj ivici dijagrama. Spajanjem tačaka b₁' i PB pravom linijom, u preseku iste sa pravom BB₁ dobijamo tačku B'. Duž BB', koja je predstavljena veličinom b₁, daje nam učešće klase -d₁+0 u smeši S koja potiče iz proizvoda B. Ukupno učešće klase krupnoće -d₁+0 u smeši iznosiće a₁+b₁. Stoga, na normali iz tačke d₁, nanosimo zbir duži a₁ i b₁ i dobijamo tačku 1 na krivoj granulometrijskog sastava smeše, čija ordinata predstavlja učešće klase -d₁+0 u smeši proizvoda A i B.

Analogno postupku iznalaženja tačke 1 na krivi S, nalazimo i ostale tačke 2, 3, 4 i 5, čije ordinate odgovaraju učešću klasa: -d₂+0; -d₃+0; -d₄+0; i -d₅+0 u smeši proizvoda A i B. Spajanjem tačaka 1, 2, 3, 4 i 5 dobijamo krivu S koja predstavlja karakteristiku krupnoće smeše proizvoda A i B.

Tablica 5.7. Izračunavanje granulometrijskog sastava kompozitnog proizvoda

Klase krupnoće u mm	Maseni udeo klase		Udeo pojedinačnih klasa Krupnoće M, %
	M _A	M _B	
-100+50	5	—	$[(100 \times 5) + (150 \times 0)] / 100 + 150 = 2,0$
-50+20	30	15	$[(100 \times 30) + (150 \times 15)] / 100 + 150 = 21,0$
-20+15	12	30	$[(100 \times 12) + (150 \times 30)] / 100 + 150 = 22,8$
-15+10	13	15	$[(100 \times 13) + (150 \times 15)] / 100 + 150 = 14,2$
-10+5	25	30	$[(100 \times 25) + (150 \times 30)] / 100 + 150 = 28,0$
-5+0	15	10	$[(100 \times 15) + (150 \times 10)] / 100 + 150 = 12,0$
Ulaz:	100	100	100,0



Sl.5.14 Grafičko određivanje granulometrijskog sastava smeše dva proizvoda (Magdalinović, 1985).

5.2.14 SPAJANJE UZORAKA RAZLIČITOG GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA (PRIMER IZ LABORATORIJE)

U laboratorijama za pripremu mineralnih sirovina vrlo često treba oformiti kompozitne uzorke, dva ili više njih, a koji se međusobno razlikuju po granulometrijskom sastavu. Isto tako u industrijskom postrojenju treba spajati sirovine, dopremljene u bunkere sa različitih radišta ili čak različitih ležišta, kako bi se dalje usmerile – tako spojene, u sledeći postupak koncentracije. Upravo iz ovih razloga na ovom delu će se razmotriti način prikazivanja granulometrijskog sastava spojenih uzoraka. U laboratorijskim uslovima neophodno je ispoštovati sledeće:

- Oba uzorka (ona koja treba spojiti) treba da budu klasirana na istoj seriji sita, odnosno istim sitima.
- Oba uzorka treba spojiti u jedan kompozitni uzorak, sabiranjem pojedinačnih masa, po klasama krupnoće, u treći novi.

♣ **Primer:** Maseni odnos dva uzorka, u kompozitnom uzorku, koji iznosi 75 kg+120 kg = 195 kg, može da se predstavi proporcijama:

$$195:100=75:M_I \quad M_I \text{ uzorka} = 38,46 \% ;$$

$$195:100=120:M_{II} \quad M_{II} \text{ uzorka} = 61,54 \% .$$

♣ **Primer:** spajanje uzoraka različitog granulometrijskog sastava, tako da je poznata masa kompozitnog uzorka (20 kg).

Drugi deo zadatka: spojiti dva uzorka u kompozitni s tim da ukupna masa bude 20 kg. Odnos dva uzorka koji se spajaju iznosi: $M_I = 38,46 \%$ i $M_{II} = 61,54 \%$.

Od ovih uzoraka treba odvojiti odgovarajuću masu, prema iznetoj proporciji, tako dobijamo:

$$100:20=38,46:M_I \text{ ili } M_I \text{ uzorka} = 7,69 \text{ kg},$$

$$100:20=61,54:M_{II} \text{ ili } M_{II} \text{ uzorka} = 12,31 \text{ kg},$$

što ukupno iznosi ukupno 20,00 kg.

Prema tome prvog uzorka treba uzeti 7,69 kg a drugog uzorka 12,31 kg.

Pitanje koje se postavlja glasi: koliki su maseni udeli pojedinačnih klasa krupnoće (kg) prvog uzorka čija je izračunata ukupna masa 7,69 kg.

$$1^* 100:7,69 \text{ kg} = 26\% : M_I' \text{ kg } M_I' = 2,00 \text{ kg}$$

$$2^* 38,46\% : 7,69 \text{ kg} = M_I : 2,00 \text{ kg } M_I = 10,00 \%$$

za drugu klasu

$$100:7,69 \text{ kg} = 20\% : M_I' \text{ kg } M_I' = 1,54 \text{ kg}$$

$$38,46\% : 7,69 \text{ kg} = M_I : 1,54 \text{ kg } M_I = 7,71 \%$$

za treću klasu

$$100:7,69 \text{ kg} = 18\% : M_I' \text{ kg } M_I' = 1,38 \text{ kg}$$

$$38,46\% : 7,69 \text{ kg} = M_I : 1,38 \text{ kg } M_I = 6,90 \%$$

i tako redom.

Zatim, koliki su maseni udeli pojedinačnih klasa krupnoće (u kg) drugog uzorka, sa ukupnom masom od 12,31 kg koje ulaze u kompozitni uzorak, dobijamo na sledeći način.

za prvu klasu

$$3^* 100:12,31 \text{ kg} = 4\% : M_{II}' \text{ kg } M_{II}' = 0,49 \text{ kg}$$

$$4^* 61,54\% : 12,31 \text{ kg} = M_{II} : 0,49 \text{ kg } M_{II} = 2,45 \%$$

za drugu klasu

$$100:12,31 \text{ kg} = 6\% : M_{II}' \text{ kg } M_{II}' = 0,74 \text{ kg}$$

$$61,54\% : 12,31 \text{ kg} = M_{II} : 0,74 \text{ kg } M_{II} = 3,70 \%$$

i tako redom.

$$6^* 100:20 \text{ kg} = 12,46\% : M_{III}$$

$$5^* M_{III} = (2,00 + 0,49) = 2,49 \text{ kg}$$

Tablica 5.8 Spajanje uzoraka različitog granulometrijskog sastava

Klase krupnoće u mm	I uzorak		II uzorak		III uzorak kompozitni materijal	
	M_I , kg	M_I , %	M_{II} , kg	M_{II} , %	M_{III} , kg	M_{III} , %
-0,295+0,208	19,50	26,00	4,80	4,00	24,30*	12,46**
-0,208+0,147	15,00	20,00	7,20	6,00	22,20	11,38
-0,147+0,104	13,50	18,00	9,60	8,00	23,10	11,84
-0,104+0,074	9,75	13,00	19,20	16,00	28,95	14,85
-0,074+0,053	8,25	11,00	21,60	18,00	29,85	15,31
-0,053+0,038	6,00	8,00	25,20	21,00	31,20	16,00
-0,038+0,000	3,00	4,00	32,40	27,00	35,40	18,16
U l a z:	75,00	100,0	120,0	100,0	195,0	100,0

* 19,50 kg + 4,80 kg = 24,30 kg;

** 195,00 : 100 = 24,30 : X X = 2430:195,00 = 12,46 %

Tablica 5.9 Spajanje uzoraka različitog granulometrijskog sastava, tako da je poznata masa kompozitnog uzorka (20 kg)

Klase krupnoće u mm	I uzorak		II uzorak		III uzorak kompozitni materijal	
	M_I , kg	M_I , %	M_{II} , kg	M_{II} , %	M_{III} , kg	M_{III} , %
-0,295+0,208	2,00 ^{1*}	10,0 ^{2*}	0,49 ^{3*}	2,45 ^{4*}	2,49 ^{5*}	12,46 ^{6*}
-0,208+0,147	1,54	7,71	0,74	3,70	2,28	11,38
-0,147+0,104	1,38	6,90	0,98	4,90	2,37	11,84
-0,104+0,074	1,00	5,00	1,97	9,85	2,97	14,85
-0,074+0,053	0,85	4,25	2,22	11,10	3,06	15,31
-0,053+0,038	0,62	3,10	2,59	12,94	3,20	16,00
-0,038+0,000	0,30	1,50	3,32	16,60	3,63	18,16
U l a z:	7,69	38,46	12,31	61,54	20,00 kg	100,0

5.2.15 GRANULOMETRIJSKI I HEMIJSKI SASTAV SIROVINE

Jedan od zadataka koji se najčešće postavlja u PMS, a vezan za određivanje granulometrijskog sastava sirovine (ili proizvoda koncentracije), je *utvrđivanje raspodele* ili distribucije datog elementa – metala, minerala ili jedinjenja *po klasama krupnoće* analiziranog uzorka. Poznavajući fizičke osobine minerala u sirovini (tvrdina, bliznjenje, cepljivost, prelom, kovnost, žilavost, elastičnost i dr.) kao i njihove strukturno-teksturne karakteristike odnosno relativne sadržaje i međusobne odnose u sirovini, znamo da se određeni minerali različito ponašaju tokom njihovog usitnjavanja a posebno finog mlevenja.

Naime, neki minerali (elementi) se ujednačeno distribuiraju po svim prisutnim klasama krupnoće, dok se drugi vrlo brzo usitnjavaju i kao rezultat toga ih najčešće registrujemo u najsitnijoj klasi krupnoće (galenit, molibdenit, grafit). Postoje i slučajevi da je tražena komponenta u najkrupnijoj klasi, kada je ispitivani mineral izrazito tvrd u odnosu na prateće komponente u sirovini.

Da bi smo došli do ovakvih podataka – o raspodeli elementa, zavisno od krupnoće zrna same sirovine, rade se *analize granulometrijskog i hemijskog sastava* date sirovine. Odnosno, svaka klasa krupnoće, klasirane sirovine se uzorkuje na odgovarajući način, a tako dobijeni – sekundarni uzorci, se hemijski analiziraju na odgovarajuće komponente ili se vrše mineraloška ispitivanja sa istim ciljem. Dobijeni podaci o sadržaju elementa, minerala ili jedinjenja se unose u tablice i izračunava ponderisana vrednost sadržaja u odnosu na odgovarajući maseni udeo svake klase krupnoće odnosno odgovara-

juća raspodela. Rezultat je maseni udeo metala u odgovarajućoj klasi krupnoće.

Način izračunavanja i prikaz rezultata dat je u narednoj tabeli 5.10.

Na osnovu tabelarnih podataka, granulometrijskog i hemijskog sastava sirovine, mogu se odrediti sledeće karakteristike:

- Srednji sadržaj metala (elementa ili jedinjenja) u rudi koji iznosi

$$M_{\text{met}} = \Sigma M_n \cdot M_{\text{met}} / \Sigma M_n = 219,78 / 100 = 2,20 \%$$

- Finoća mlevenja rude, kao maseni udeo klase 0,074+0,000 mm (udeo ove klase iznosi 3,43 %).

- Sadržaj i udeo metala u pojedinačnim klasama krupnoće ispitivane sirovine.

- Sadržaj i udeo metala u spojenim klasama krupnoće ispitivane sirovine.

Ilustrujemo to na jednom primeru. Zadatak je spojiti klase krupnoće -1,651+1,168 mm i -1,168+0,833 mm, a za novo dobijenu klasu krupnoće izračunati sadržaj i udeo metala kao i maseni udeo date klase.

Pored toga, na osnovu podataka granulometrijskog i hemijskog sastava (tabelarnog i grafičkog prikaza) mogu se dobiti i drugi podaci.

- Za određeni, dati granični prečnik (krupnoću zrna sirovine) moguće je odrediti maseni udeo odseva i proseva kao i sadržaje i udele metala u njima.
- Preko ovih podataka moguće je pratiti i finoću mlevenja prisutnih (konstitutivnih) minerala (preko njihovih udela u najsitnijoj klasi krupnoće).

Tablica 5.10 Granulometrijski i hemijski sastav sirovine

Klase krupnoće u mm	Maseni udeo klase $M, \%$	Sadržaj metala $M_{\text{met}}, \%$	Jedinice metala $M \times M_{\text{met}}$	Raspodela, udeo metala $R_{\text{met}}, \%$
-1,651+1,168	4,60	0,85	3,91	1,78 ^{1*}
-1,168+0,833	3,84	0,96	3,69	1,68
-0,833+0,589	17,28	1,25	21,60	9,83
-0,589+0,417	18,04	1,48	26,70	12,15
-0,417+0,295	18,88	2,10	39,65	18,04
-0,295+0,208	15,34	2,35	36,05	16,40
-0,208+0,147	10,22	3,20	32,70	14,88
-0,147+0,104	7,28	4,50	32,76	14,90
-0,104+0,074	1,09	4,80	5,23	2,38
-0,074+0,000	3,43	5,10	17,49	7,96
Uk: a z:	100,00	2,20	2,19,80	100,00

M-maseni udeo klase pojedinačno; M_{met} -sadržaj metala u klasi; $M \times M_{\text{met}}$ -jedinice metala;

R_{met} -raspodela odnosno udeo metala po klasama krupnoće (ponderisana vrednost sadržaja na maseni udeo klase).

1* 219,78:100%=3,91:X X=1,78%

Napomena: ukoliko se metal (element koji pratimo) javlja samo u jednom mineralu u ispitivanoj sirovini, onda je raspodela metala jednaka raspodeli minerala (nosioca tog elementa).

Tablica 5.11 Spajanje klase krupnoće

Klase krupnoće u mm	$M, \%$	$M_{\text{met}}, \%$	$M \times M_{\text{met}}$	$R_{\text{met}}, \%$
-1,651+1,168	4,60	0,85	3,91	1,78
-1,168+0,833	3,84	0,96	3,69	1,68
Uk: -1,651+0,833	8,44	0,90 ^{1*}	7,60	3,46

1* $M_{\text{met}} = \Sigma M_n \times M_{\text{met}} / \Sigma M_n = 7,59/8,44 = 0,90 \%$

5.2.16 GRANULOMETRIJSKE I HEMIJSKE KARAKTERISTIKE ODSEVA

Kada je reč o kumulativnim karakteristikama krupnoće, razlikujemo kumulativnu karakteristiku krupnoće "po plusu" - odseva $R=f_{(d)}$ i kumulativne karakteristike krupnoće "po minusu" - proseva $D=f_{(d)}$. (Ako se na ordinati nanosi odsev na odgovarajućem situ onda dobijamo kumulativnu karakteristiku krupnoće "po plusu" - odseva. Ako se na ordinati nanosi prosev kroz odgovarajuće sito onda dobijamo kumulativnu karakteristiku krupnoće "po minusu" - proseva. Ako su obe karakteristike krupnoće prikazane na jednom grafiku, onda ordinata njihovog preseka iznosi uvek 50 %) Parcijalno, pojedinačno, učešće bilo koje klase krupnoće $-d_2+d_1$, po kumulativnoj karakteristici krupnoće određuje mu kao razliku ordinata na prečnicima d_1 i d_2 .

$$M=R(d_1)-R(d_2)=D(d_2)-D(d_1)$$

✱Primer: na osnovu podataka iz tablice 5.12 i grafika na slici 5.15, treba uraditi sledeće – za granični prečnik $d=0,295$ mm, koliki je maseni udeo u odsevu ("po plusu"), a koliki maseni udeo u prosevu ("po minusu"). Koji su sadržaji metala a koliki udeli metala.

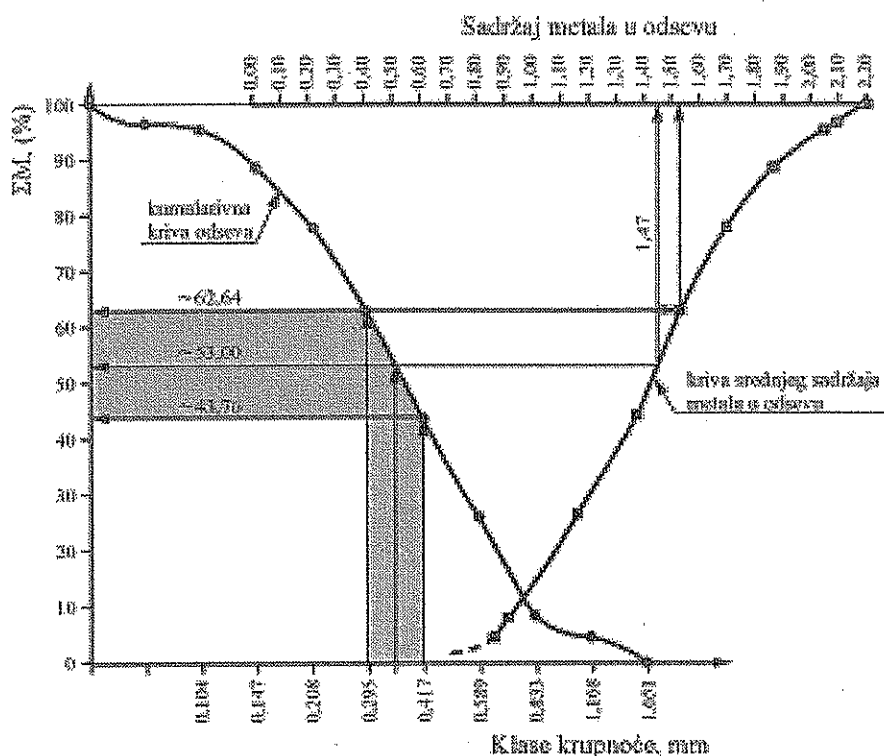
✱Primer (drugi deo): za granični prečnik $d=0,350$ mm, koliki je maseni udeo u odsevu ("po plusu"), a koliki maseni udeo u prosevu ("po minusu"). Koji su sadržaji metala a koliki udeli metala.

Za granični prečnik $d=0,350$ mm (0,355 mm je sito iz dopunske serije -Tayler-ove serije laboratorijskih sita od 42 #) očitati masene udele odseva i proseva kao i sadržaje metala u njima da bi se zatim računski dobili i podaci o udelu metala u odsevu i prosevu odnosno da bi se dobio maseni udeo i sadržaj metala u odsevu a potom računski izračunao udeo i sadržaj metala u prosevu.

✱Primer (treći deo): za granični prečnik $d=0,350$ mm, koji deli klasu krupnoće $-0,417+0,295$ mm na dve podklase, naći njihove masene udele, sadržaje metala u njima i udele metala.

Tablica 5.12 Granulometrijske i hemijske karakteristike odseva

Klase krupnoće u mm	M, %	Sadržaj metala M_{met} , %	Jedinice metala $M \times M_{met}$	$\downarrow \Sigma M$, % Odsev	Jedinice metala u odsevu $\downarrow \Sigma M \times M_{met}$	Sadržaj metala u odsevu $\downarrow \Sigma M \times M_{met}$ $\downarrow \Sigma M$
-1,651+1,168	4,60	0,85	3,91	4,60	3,91	0,85
-1,168+0,833	3,84	0,96	3,69	8,44	7,60	0,90
-0,833+0,589	17,28	1,25	21,60	25,72	29,20	1,14
-0,589+0,417	18,04	1,48	26,70	43,76	55,90	1,28
-0,417+0,295	18,88	2,10	39,65	62,64	95,54	1,53
-0,295+0,208	15,34	2,35	36,05	77,98	131,60	1,69
-0,208+0,147	10,22	3,20	32,70	88,20	164,30	1,86
-0,147+0,104	7,28	4,50	32,76	95,48	197,06	2,06
-0,104+0,074	1,09	4,80	5,23	96,57	202,29	2,09
-0,074+0,000	3,43	5,10	17,49	100,0	219,78	2,20
U l a z:	100,0	2,20	219,8	-	-	-



Sl.5.15 Grafički prikaz podataka iz tablice 5.12. Kumulativne krive odseva i krive sadržaja metala u odsevu

Tablica 5.13 Karakteristike krupnoće za granični prečnik $d=0,295$ mm.

"Zasecanje" na $d=0,295$ mm	Klase krupnoće u mm	M, %	M_{met} , %	$M \times M_{met}$	R_{met} , %
Odsev	-1,651+0,295	62,64 ^{1*}	1,53 ^{1*}	95,55 ^{1*}	43,48
Prosev	-0,295+0,000	37,36	3,32 ^{4*}	124,23 ^{3*}	56,52 ^{3*}
Sirovina	Ulazna sirovina:	100,00 ^{3*}	2,20 ^{2*}	219,78 ^{2*}	100,00

^{1*}Podaci iz velike tabele 5.12. (maseni udeo odseva, sadržaj metala u odsevu, udeo metala u odsevu).^{2*}Podaci iz velike tabele 5.12. (ulazne karakteristike sirovine).^{3*}219,78 - 95,55 = 124,23 jedinica metala.^{4*}124,23 : 37,36 = 3,32 % sadržaj metala u prosevu.^{5*}Udeo metala u prosevu.Tablica 5.14 Kvalitet odseva i proseva za granični prečnik $d=0,350$ mm.

"Zasecanje" na $d=0,350$ mm	Klase krupnoće u mm	M, %	M_{met} , %	$M \times M_{met}$	R_{met} , %
Odsev	-1,651+0,350	53,00 ^{1*}	1,47 ^{2*}	74,20	33,76 ^{6*}
Prosev	-0,350+0,000	47,00	3,10 ^{3*}	145,58 ^{4*}	66,24
Sirovina	Ulazna sirovina:	100,00 ^{3*}	2,20 ^{2*}	219,78 ^{3*}	100,00 ^{3*}

^{1*}Podaci očitani sa grafika (Sl.5.15).^{2*}Podaci očitani sa grafika (Sl. 5.15).^{3*}Date vrednosti iz glavne tablice 5.12).^{4*}219,78 - 74,20 = 145,58 jedinica metala.^{5*}145,58 : 47,00 = 3,10 % sadržaj metala u prosevu.^{6*}219,78 : 100 = 74,20 : X X=33,76 % -raspodela metala u odsevu.Tablica 5.15 Kvalitet podklasa za granični prečnik $d=0,350$ mm.

"Zasecanje" na $d=0,350$ mm	Klase krupnoće u mm	M, %	M_{met} , %	$M \times M_{met}$	R_{met} , %
Podklasa I	-0,417+0,350	9,24 ^{3*}	1,98 ^{6*}	18,30 ^{5*}	8,33 ^{8*}
Podklasa II	-0,350+0,295	9,64 ^{2*}	2,21 ^{7*}	21,35 ^{4*}	9,71 ^{9*}
Sirovina:	Ulazna klasa krupnoće: -0,417+0,295	18,88 ^{1*}	2,10 ^{1*}	39,65 ^{1*}	18,04 ^{1*}

^{1*}Podaci očitani iz tablice 5.12.^{2*} $M_{0,295} - M_{0,350} = 62,64 - 53,00 = 9,64$ %. $M_{0,350} = 53,00$ % sa grafika (Sl.5.15).^{3*} $M_{0,350} - M_{0,417} = 53,00 - 43,76 = 9,24$ %^{4*} $(62,64 \times 1,53) - (53,00 \times 1,40) = 21,35$.^{5*}39,65 - 21,35 = 18,30 jedinica metala.^{6*}18,30 : 9,24 = 1,98 % sadržaj metala u podklasi.^{7*}21,35 : 9,24 = 2,21 % sadržaj metala u podklasi.^{8*}39,65 : 18,04 = 18,30 : X X = 8,33 % udeo metala u podklasi.^{9*}39,65 : 18,04 = 21,35 : X X = 9,71 % udeo metala u podklasi.

Tablica 5.16 Granulometrijski i hemijski sastav smeše dva uzorka, različitog granulometrijskog i hemijskog sastava

Klase krupnoće u mm	Uzorak I			Uzorak II		
	M_i , %	M'_{met} , %	$M_i \times M'_{met}$	M_{ii} , %	$M'_{met,ii}$, %	$M_{ii} \times M'_{met,ii}$
-0,295+0,208	10,00	1,50	15,00	2,45	0,30	0,74
-0,208+0,147	7,71	1,70	13,11	3,70	0,60	2,22
-0,147+0,104	6,90	1,90	13,11	4,90	0,90	4,41
-0,104+0,074	5,00	2,40	12,00	9,85	1,40	13,79
-0,074+0,053	4,25	2,80	11,90	11,10	1,50	16,65
-0,053+0,038	3,10	3,60	11,16	12,94	1,80	23,39
-0,038+0,000	1,50	3,90	5,85	16,60	2,00	33,22
U l a z:	38,46	2,14	82,13	61,54	1,53	94,30

Tablica 5.17 Granulometrijski i hemijski sastav kompozitnog uzorka.

Klase krupnoće u mm	Uzorak III - kompozitni uzorak		
	M_{III} , %	$M'_{met,III}$, %	$M_{III} \times M'_{met,III}$
-0,295+0,208	12,46	1,26 ^{2*}	15,74 ^{1*}
-0,208+0,147	11,38	1,35	15,33
-0,147+0,104	11,84	1,48	17,52
-0,104+0,074	14,85	1,74	25,79
-0,074+0,053	15,31	1,86	28,55
-0,053+0,038	16,00	2,15	34,45
-0,038+0,000	18,16	2,15	39,05
U l a z:	100,0	1,76	176,43

^{1*}15,00+0,74=15,74^{2*}15,74:12,46=1,26 %

5.2.17 SPAJANJE UZORAKA RAZLIČITOG GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA I RAZLIČITOG HEMIJSKOG SASTAVA

Kao što smo videli u predhodnim lekcijama, pored razlike u granulometrijskim sastavima uzoraka koji se spajaju, normalno je da se uzorci (odnosno klase krupnoće) razlikuju i po svom hemijskom sastavu. To mogu biti uzorci mleveni do različitih finoća, uzorci sa različitih pravaca u industrijskom procesu koncentracije (krupnije klase se vraćaju na domeljavanje-otvaranje sirovine),

samlevena sirovina iz mlinova različitih sekcija, odnosno mlinova koji sirovinu dovode do različitih finoća itd. Upravo zbog ovakvih primera smo često u prilici da spajamo različite uzorke a da pri tome moramo znati granulometrijski sastav i raspodelu korisne komponente u kompozitnom uzorku. U tablici 5.16 prikazan je jedan takav primer.

Polazni podaci o granulometrijskom sastavu i odnosima u kojima se dva uzorka spajaju u kompozitni uzeti su iz tablice 5.9.

5.3 GRANULOMETRIJSKA ANALIZA ZRNA MALIH PREČNIKA (SUB SITOVNA ANALIZA)

Karakterizacija praškastih (fino samlevenih) materijala u pogledu određivanja krupnoće zrna minerala ili agregata odnosno utvrđivanja granulometrijskog sastava izučava se na Smeru za pripremu mineralnih sirovina u sklopu predmeta Metode ispitivanja mineralnih sirovina, zatim na usmerenju za petrologiju i geochemiju, kod ispitivanja sedimentnih stena odnosno u sedimentologiji, u sklopu predmeta mehanika tla na usmerenju za inženjersku geologiju, zatim u sklopu mehanike stena, vrlo je važna karakteristika u prospekcijskoj ležišta mineralnih sirovina, mineralogiji i mnogim drugim oblastima na Rudarsko-geološkom fakultetu. Na širem planu ovakav materijal može vrlo korisno poslužiti i studentima, magistrantima i doktorantima kako na RGF tako i onima sa tehnološkog, farmaceutskog, šumarskog ili nekog drugog fakulteta u oblasti gde je neophodno poznavati dimenzije zrna i čestica, odnosno određivati krupnoću i analizirati granulost sastav materijala.

5.3.1 UVOD

Za savremeni razvoj tehnike, karakteristično je sve veća potreba za fino samlevenim materijalima. Prevoenje mnogih sirovina u praškasto stanje (fino samlevene materijale) danas predstavlja osnovnu operaciju pri proizvodnji različitih građevinskih materijala, keramike, stakla, u metalurgiji, preradi ruda i td. Praškasti materijali se koriste i kao cementna veziva ili zapunitelji u hemijskoj industriji, farmaciji.

Karakteristike fino samlevenih materijala (prahova) pre svega se određuju njihovom disperznošću odnosno krupnoćom čestica. Time se može objasniti značaj određivanja granulometrijskog sastava - disperzione analize, za savremeni razvoj tehnike, agronomije i medicine. Od granulometrijskog sastava cementa zavisi čvrstina betona, vreme očvršćavanja, otpornost na mraz i druga svojstva. Kod boja, sposobnost prekrivanja bojenih površina, zavisi od finoće pigmenta. U termoelektranama krupnoća čestica čvrstih mineralnih goriva (uglja) utiče na pravilan rad kotlovskih postrojenja i stepen iskorišćenja pri sagorevanju.

Granulometrijski sastavi abrazionih materijala (kvarc, korund, dijamant i drugi) imaju presudan značaj na tačnost obrade šlifovanih materijala. Od finoće mlevenja praškastih materijala zavise mnogi tehnološki procesi kako u PMS, tako i metalurgiji, industriji građevinskih materijala, farmaciji, hemijskoj industriji i drugih.

Utvrđivanje granulometrijskog sastava ili disperzione analize predstavlja jedini način kontrole svih operacija vezanih sa procesima mlevenja i klasiranja praškastih materijala. S obzirom na oblasti i različite procese gde se sve mogu koristiti, postoje i mnogobrojne metode određivanja granulometrijskog sastava odnosno metode disperzione analize. One se posebno široko koriste pri naučno istraživačkom radu, kod razrade novih tehnologija, tehnoloških procesa ultra finog mlevenja minerala (mehanochemijska aktivizacija minerala visokoenrgetskim mlinovima).

Izvesne količine, fino dispergovanih čestica praškastih materijala, upravo zbog svojih karakteristika se tokom mlevenja, klasiranja, transporta ili dalje prerade, raznose strujanjem vazduha i raspršuju po tlu, čime sve više ugrožavaju životnu sredinu i akumuliraju se u ljudskom organizmu.

Zaštita životne sredine, sa aspekta PMS, podrazumeva, između ostalog, tehnološka rešenja gde neće biti ili će biti svedeno na dozvoljenu meru ispuštanje u atmosferu ili vodotokove čestica koje će ugroziti životnu sredinu i zdravlje ljudi. Da bi se ovo sprovedo danas se mnogo pažnje posvećuje tehnologijama odprašivanja gasova i čišćenju otpadnih voda od mineralnih čestica i stoga je neophodno stalno imati na umu važnost ovih zadataka kako sa tehnološkog aspekta već i sa socijalnog, zdravstvenog i ekološkog.

Za regulisanje i pravilno korišćenje uređaja za odprašivanje, filtriranje ili druge načine odklanjanja čestica minerala iz gasova ili voda, neophodno je sprovesti čitav niz praćenja i merenja. U takvom složenom sistemu (monitoringa), analiza granulometrijskog sastava ili analiza disperznog sastava čestica, ima posebno značajnu ulogu. Bez podataka o stepenu disperznosti odnosno karakterizacije čestica nije moguće dati objektivnu efektivnost rada uređaja ili primenjenih postupaka prečišćavanja gasova i voda.

5.3.2 IZBOR UREĐAJA ZA ANALIZU

Određivanje distribucije čestica po krupnoći u formi granulometrijskog sastava ili samo merenje dimenzija čestica je vrlo važan podatak pri karakterizaciji fino samlevenih materijala (sirovine). Pregled najčešće korišćenih tehnika i instrumenata kod određivanja granulostava, počev od sitovne analize, sedimentacije, elutriacije, analize slika i drugih dat je u narednoj tablici 5.18.

Table 5.18 Uvodni pregled postupaka merenja krapnoće zrna i određivanja granulometrijskog sastava sirovine – metode i tehnike

Opis metode razvrstavanja		Teh. i vr. vrstje		Medijum	Raspodjela veličina ili granica granulacija, µm	Vrijeme izvođenja min.	Uredjaji, proizvođači
Opis metode	Opis vrstje	Opis metode	Opis vrstje				
Geometrijske	Fizička priroda	Presjecanje konvencionalno - ručno	Tehnol. (vođa)	> 30 µm (10-1000)	2 h	Sila: Enders, Tyler, Fritsch, Fisher, La Paz, Alpine	
		Presjecanje konvencionalno - strojno	"	< 30 µm	30 min.	"	
		Presjecanje puzavimom	Tehnol. - gas	"	"	"	
		Presjecanje kabliravimom	Tehnol. - gas	"	"	"	
Mehaničke	Kružno krzno pudanje zrna u gravitacionom ili centrifugalnom polju	Presjecanje ultrazvučno - mikro sila	Tehnol.	> 5 µm (1-20 µm)	15 min.	ATM Corporation, Veco, Enders, Alpine	
		Sedimentacija - gravitacija	Tehnol.	0,5-50 µm	4 h	Machida Kaka, Karpapanda, Suburini, Sceptus vija, Andraszova pipeta	
		Sedimentacija - centrifugalna u vodorav.	Gas	1-100 µm (0,01-20 µm)	60 min.	Aoyee Leeb,	
		Sedimentacija - centrifugalna u vert.	Tehnol.	0,0012-10 µm	"	"	
Optičke	Projekcija slike, preputanje svetlosti, odbojnost svetlosti, poduzetost, difrakcija svetlosti	Formulacionacija - gravitacija	Tehnol.	"	30 min.	LEICOLSEH, Fritsch sedimentograf, Fritsch Mikron Sizer, Micromeritics Sedigraph, Malvern Granulometer	
		Polosedimentacija - centrifugalna	Tehnol.	"	"	"	
		Eltanacija - gravitacija	Tehnol. - gas	> 10 µm (10-100 µm)	"	ADAP Alpine AVO,	
		Eltanacija - centrifugalna	Tehnol. - gas	> 10 µm (5-100 µm)	"	Baker, Warrus Cyclometer, Haulin labaszer,	
Električne	Kapacitivnost, kapacitivnost, refleksibilnost, napajanje	Puzavimom polarnostni mikroskop	"	> 1 µm	"	Leib, Zeiss, Vickers, Azeasum Optical,	
		Ručni polarizacioni mikroskop	"	> 1 µm	"	Bausch & Lomb, Nipon	
		Sličenje elektronske mikroskopije	"	0,05-100 µm	"	"	
		Transparentna elektronska mikroskopija	"	< 10,1 µm	"	"	
Fizčke	Adsorpcija, kapacitivnost, refleksibilnost, napajanje	Analizator slike	"	"	"	"	
		Elektronski mikroskop	"	"	15 min.	Quintus, Nipon, Zeiss	
		Presjecanje zrna i napajanje snage isključeno zrna	Tehnol.	0,002-15 µm	30 min.	Hilachi, Siemens	
		Napajanje napajanje napajanje napajanje napajanje	Tehnol.	< 0,5 µm	30 min.	Candler Counting, Colloidscope, Electrozone	
Termičke	Migracija zrna u termalnom gradjenju	Indukcijski napajanje	"	1-30 µm	"	Clayton, Drexel & Lupton, Mene	
		Količina fluida adsorpcije na površini zrna	Tehnol. - gas	< 20 µm	8 h	Perkin-Elmer, Sarskara, Microanalitics, American	
		Oporost tebe fluida isključeno napajanje zrna u "poslijeci"	Tehnol. - gas	0,1-50 µm	1 h	"	
		Napajanje napajanje napajanje napajanje napajanje	Tehnol. - gas	2-1000 µm	"	"	
Termičke	Migracija zrna u magnetičnom polju	Migracija zrna u termalnom gradjenju	"	0,01-40 µm	15 min.	Strophysius Inc., Phenix Precision	
		Orificij po površini	"	2-200 µm	"	"	
		Formiranje i deprecijacija zrnica	"	"	"	"	
		Migracija zrna u magnetičnom polju	Gas	0,1-100 µm 0,01-1 µm	"	"	
Mehaničke	Kondenzacija	Rad nukleusa uz kontrolisanu supersaturaciju	Gas	0,001-2 µm	"	"	

Određivanje granulometrijskog sastava ili merenje krupnoće čestica je jedna od najčešće korišćenih tehnika za kontrolu procesa i karakterizaciju proizvoda u mnogim oblastima industrije koje se bave pripremom i daljom preradom mineralnih sirovina. Takođe, određivanje krupnoće čestica je prisutno i u medicinskim, biološkim i farmaceutskim istraživanjima. Tehnike koje se koriste za utvrđivanje i prikazivanje podataka o distribuciji krupnoća čestica (granulo sastava) se međusobno razlikuju zavisno od područja gde se primenjuju, odnosno od raspona krupnoća koja se mere (od sitovne analize za krupnozrnije materijale do elektronske mikroskopije za najsitnije čestice).

Principi na kojima se zasnivaju, prednosti i ograničavajući faktori u primeni pojedinih postupaka dati su u daljem tekstu, uz odgovarajuće primere, a na osnovu iskustava u različitim laboratorijama.

U ovom materijalu su prikazani najčešće korišćeni instrumenti i principi na kojima se određeni postupci zasnivaju za svaki od izdvojenih tipova, odnosno mehanizama prema kojima su razvrstani, odnosno prema metodama određivanja krupnoće. Pored toga dati su i najsavremeniji uređaji koji se zbog svoje složenosti i cene nalaze u upotrebi samo u najpoznatijim laboratorijama.

Ovde se imao u vidu veoma brz razvoj tehnike u ovoj oblasti, tako da će postupci pomenuti kao novi ili u razradi, za vrlo kratko vreme biti pušteni u serijsku proizvodnju i postati široko prihvaćeni.

Danas se na tržištu nudi veliki broj novih instrumenata za određivanje granulometrijskog sastava, odnosno veličine čestica sitnozrnih materijala, a koji funkcionišu na različitim principima i tehnikama merenja. Iz tog mnoštva uređaja vrlo je teško odabrati onaj odgovarajući i optimalan. Stoga je od koristi, a pre samog donošenja konačne odluke o nabavci, poseta specijalizovanim izložbama, prisustvovanje naučnim i stručnim skupovima na kojima se razmatra ova problematika, a pored toga treba uložiti i dosta rada kao i izvesti relativno veliki broj različitih eksperimenata. Naravno, nije uvek neophodno ovako ozbiljno i naporno istraživanje, ali treba imati u vidu da ponekad jedna na brzinu doneta odluka može značiti lošu investiciju ukoliko odabrani instrument ne ispunjava ili delimično zadovoljava postavljene zahteve. Kao pomoć pri izboru instrumenta, analitičar treba da razmotri sledeće fakore:

5.3.3 PRIMENA

Izbor instrumenata za određivanje granulometrijskog sastava zavisi od namene zbog koje se određena analiza vrši. Tako na primer u pripremi mineralnih sirovina jednostavnim prosejavanjem može se vršiti kontrola procesa usitnjavanja mineralne sirovine sa ciljem da se ustanovi da li su korisni minerali dovoljno oslobođeni.

Mnogobrojne metode klasiranja zasnovane na različitim principima i tehničkim rešenjima uslovljene su određenim specifičnostima, odnosno potrebama i zahtevima pri testiranju usitnjene ili fino samlevene sirovine. Naročiti progres u oblasti merenja – određivanja krupnoće čestica, poslednjih godina je postignut kod opreme i uređaja za analize materijala u predelu ispod 5 μm kod ultrafino mlevenih sirovina. Univerzalan uređaj za sve finoće i merenja svakako još ne postoji. Svaki uređaj

pokriva samo relativno mali deo kompleksnih problema, s obzirom na upotrebljivost sirovine, merenja i analize, tačnost, reproduktivnost, pripremu i rukovanje, cenu itd.

Zahtevi pri izboru opreme i njene primene se zasnivaju na sledećim pitanjima:

- ♦ Koji je raspon krupnoće ispitivane sirovine od posebnog interesa korisniku
- ♦ Koliko je važno pitanje – vreme trajanja analize
- ♦ Koju vrstu materijala ili sirovine treba analizirati
- ♦ Koji je stepen tačnosti i pouzdanosti dobijenih podataka koje daje određeni uređaj
- ♦ Koji se stepen reproduktivnosti zahteva od uređaja, i druga pitanja.

Na Sl. 5.16. ilustrovani su neki od najčešće korišćenih postupaka određivanja granulometrijskog sastava i odgovarajući rasponi krupnoća koje pokrivaju.

Razmotrimo ovo pitanje za neke od grupa postupaka određivanja granulometrijskog sastava koji se najčešće koriste.

□ Metode klasiranja – prosejavanjem kojima se određuje raspodela zrna po krupnoći, i koje se zasnivaju na određivanju masenog udela nadrešetnih i podrešetnog proizvoda.

Prednosti metoda su: – da je krupnoća zrna određena uređajem (sitom) za prosejavanje i ne mora se indirektno proračunavati; – pri pažljivom izvođenju, ima izuzetno visoku reproduktivnost; – moguća je analiza velikih serija i znatnih količina.

Mane: suvo prosejavanje nije moguće ispod 10 μm , mada se retko suvo prosejava i ispod 74 μm (čak se i ultrasićima prosejava u medijumu voda).

□ Metod sedimentacije, kod koga se meri udeo nataloženih čestica, a krupnoća zrna se računa preko odgovarajućeg ekvivalentnog prečnika.

Prednosti metoda su: – da u području laminarnog kretanja čestica, na konačnu brzinu padanja čestica kroz fluid, uticaj oblika čestica je neznatan. Prema tome metodom sedimentacije je moguće klasirati i nesferična zrna.

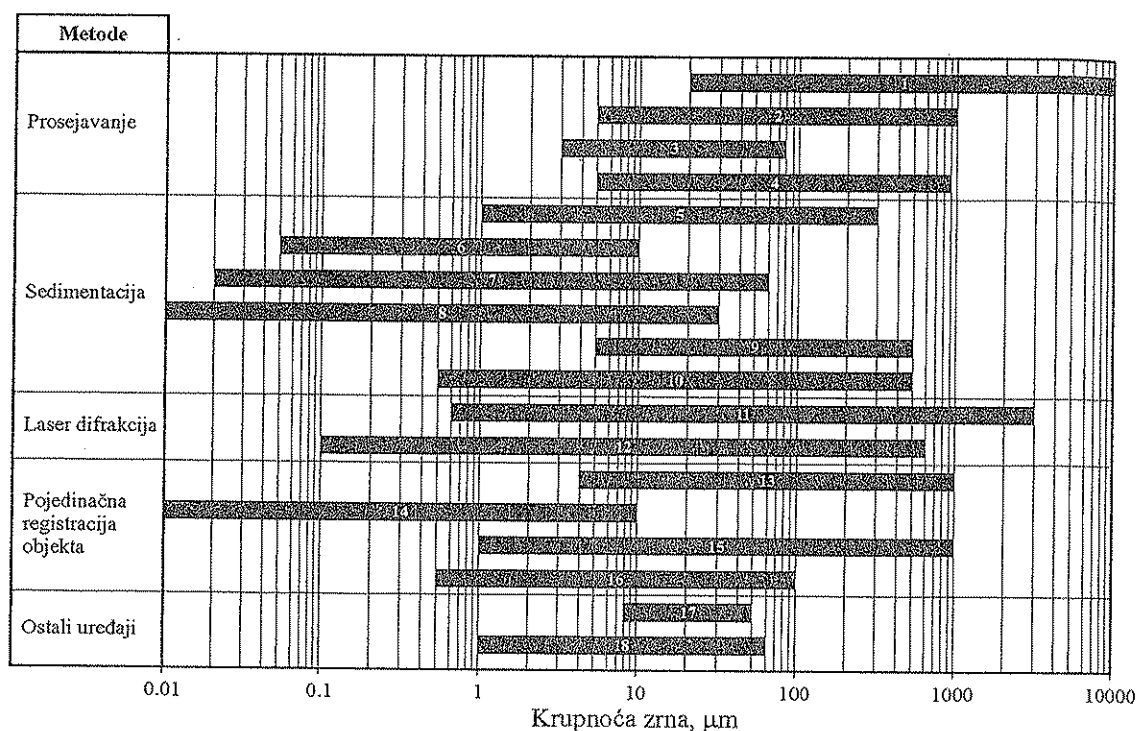
Mane: kao loša strana metoda je relativno dugo vreme analize, kao i detaljna i složena priprema.

□ Metod difrakcije laserskih zraka – kod ovog metoda kojim se registruje spektar laserskog snopa usmerenog na čestice, a ekvivalentni prečnik sferične čestice se izračunava iz distribucije difrakcionog spektra.

Prednosti metoda su: – da je ovo izuzetno brz metod; – širokog raspona merenja; – merenja su moguća bilo u tečnosti bilo u gasu.

Mane: – sirovina za analizu ne sme biti providna; – vrlo je važno i to da metod zahteva pažljivu interpretaciju rezultata; – vrednosti veličina ispod 1 μm kao i deo materijala od oko 3% se određuje sa izvesnom nepreciznošću.

□ Kod metoda analize slika se direktno mere veličine zrna, a mogu se određivati i oblici zrna. Ali metod zahteva dosta vremena, posebno ako je raspon krupnoće širi.



Sl. 5.16. Ilustracija najčešće korišćenih postupaka određivanja granulometrijskog sastava i odgovarajući rasponi krupnoća koje pokrivaju. **Legenda:** Metode prosejavanja: suvo prosejavanje, mokro prosejavanje. Metode sedimentacije metode: u gravitacionom polju, u centrifugalnom polju. Metod laserske difrakcije: metode difrakcione spektroskopije. Metode pojedinačne registracije objekta: optički mikroskop, elektronski mikroskop, princip Coultera (elektroimpulsni granulometar), metode rasipanja svetlosti. Ostale metode: klasifikatori. (1-Suvo prosejavanje; 2-Mokro prosejavanje (5-1000 μm); 3-Pneumatska sita (5-1000 μm); 4-GILSON-ova ultrasonična mikrosita (5-850 μm); 5-Gravitacijska sedimentacija (1-300 μm); 6-Fritsch-ova centrifugalna pipeta (0,05-10 μm); 7-Centrifugalna pipeta Alpina 400 SZF (0,2-15 μm); 8-Centrifugalna sedimentacija (0,01-20 μm); 9-Fritsch-ov A-20 fotosedimentograf (0,5-500 μm); 10-LUMOSSED - Retsch-ov fotosedimentometar (0,5-500 μm); 11-Fritsch-ov laserski analizator A-22 (0,16-1160 μm); 12-CILAS - laserski analizator (Companie Industrielle des lasers, Francuska) (0,1-600 μm); 13-Optički mikroskop (4-1000 μm); 14-Elektronski mikroskop (0,03-10 μm); 15-Elektroimpulsni analizator, Coulter-Caunter (1-1000 μm); 16-Sistem laserskog skenera čestica (0,5-100 μm); 17-Cyclosizer (8-50 μm); 18-Bahco-ov centrifugalni klasifikator mikročestica (1-60 μm)).

5.3.4 POTREBNI PODACI

Izbor nekog instrumenta u datoj situaciji uslovljen je vrstom potrebnih podataka. Tako instrumenti koji rade na principu prelamanja svetlosti daju podatke o distribuciji krupnoće čestica, srednjoj veličini čestica i o veličini slobodnih površina čestica. Instrumenti koji se zasnivaju samo na merenju slobodnih površina daju samo srednju vrednost prečnika čestica, a ne i granulostav.

Recimo, kod pripreme titanijumoksida (rutila) kao pigmenta za potrebe industrije boja, određivanje granulometrijskog sastava preko srednjeg projektovanog prečnika (prečnika ekvivalentne površine) će najviše odgovarati. Prema tome, za ove potrebe treba odabrati neki optički instrument koji će kao rezultat analize merenja krupnoće davati srednji ekvivalentni prečnik čestica uzorka. Bez dobro sagledane primene određenog analitičkog postupka, čak i najtačniji i precizno dobijeni rezultati mogu biti irelevantni za cilj zbog koga su ispitivanja izvedena.

Zbog mnoštva različitih instrumenata koji se nude na tržištu, a koji mogu pružiti raznovrsne podatke, vrlo je važno unapred znati kakvi su nam podaci stvarno potrebni iz date analize, pre nego se sam instrument odabere za rad.

5.3.5 SREDINE KLASIRANJA

Prema medijumu, izbor instrumenta zavisiće od toga da li je medijum za suspenziju tečnost ili gas. A to će zavisi od vrste materijala koji će se ispitivati (rastvorljiv u vodi ili drugoj tečnosti, polazni materijal za analizu se već nalazi u obliku suspenzije, čestice koje lebde u vazduhu, a same su rastvorljive u vodi itd.).

5.3.6 RASPON KRUPNOĆE

Krupnoća čestica koje se ispituju često nameću tip uređaja koji se može koristiti pri određivanju granulostava, odnosno krupnoće čestica. Instrumenti koji se zasnivaju na metodama sedimentacije i to gravitacijske nisu pogodni za čestice manje od jednog mikrometra. Istovremeno, čestice krupnije od 100 mikrometara se talože suviše brzo. Prema tome sedimentacija, zahvaljujući gravitaciji, se uspešno može koristiti za čestice u rasponu od 1 do 100 mikrometara. Sa druge strane, optičkim mikroskopom se mogu precizno meriti čestice recimo do 0,5 mikrometara. Za merenje sitnijih zrna ili čestica može se koristiti elektronski mikroskop.

5.3.7 TAČNOST

Pojam tačnosti u određivanju krupnoće čestica, odnosno granulometrijskoj analizi je tesno vezan za pojam vremena i cene koštanja, te prema tome preporučuje se pažljivo sagledavanje zahteva i mogućnosti instrumenta pri njihovom izboru za neku datu primenu. U svakom slučaju, bilo koji instrument da se koristi za izvođenje analize, neophodan je samo relativno mali deo uzorka i stoga je vrlo važno da taj uzorak bude što reprezentativniji. Ovo je posebno važno kada se ima u vidu verodostojnost i smislenost dobijenih podataka.

5.3.8 BROJ UZORAKA

Pri izboru instrumenta za određivanje granulosastava datog materijala, jedan od važnijih faktora koje treba razmotriti je broj uzoraka koje je potrebno analizirati. Drugim rečima, treba pažljivo prosuditi između tražene preciznosti i raspoloživog vremena, jer analitičar nema na raspolaganju beskrajno mnogo vremena da bi dovršio neku analizu. Neki instrumenti kao što je analizator slike, rudni mikroskop i elektronski mikroskop zahtevaju relativno dugo vreme za pripremu specijalnih uzoraka - preparata i baždarenje instrumenata. S tim da jednom podešen instrument za neku posebnu analizu može kasnije davati tražene podatke za veoma kratko vreme. S druge strane imamo centrifugalnu Andreasenovu pipetu za čiji rad je potreban skoro čitav dan da bi se kompletirala neka analiza. Prema tome izbor instrumenta za specifične namene treba da se bazira na sledećem: broju uzoraka koje treba analizirati u datom vremenu, ceni i zahtevanoj preciznosti.

5.3.9 KOLIČINA UZORKA

Kada se jednom utvrdi vrsta podataka koji se zahtevaju od neke analize, neophodno je uzeti u razmatranje i količinu uzorka koja je potrebna pri izboru instrumenta koji će biti najpogodniji da bi se došlo do željenih podataka. Primera radi, za prosejavanje fino samlevenog materijala, mikrositima količina uzorka od 100 g bi bila dovoljna, a dobijen rezultat granulosastava bi bio sa tačnošću 5-10 %, međutim ukoliko imamo na raspolaganju samo 10 g uzorka, greška klasiranja može biti i do 50% jer će zavisiti od gubitaka tokom prosejavanja i od greške merenja. Sa druge strane, pri zadovoljavajućoj

tačnosti analize, za određene metode, količina potrebnih uzorka se može značajno razlikovati i ponekad biti od presudnog uticaja na izbor postupka analize. Neki primeri su dati u narednoj tablici 5.19.

5.3.10 VRSTA UZORKA

Priroda uzorka, uopšte, nema posebnog uticaja na izbor instrumenta jer je većina sposobna da obrađuje različite vrste uzoraka. Međutim, i tu može da se nađe neki izuzetak, tako se ne može vršiti mokro prosejavanje materijala koji je rastvorljiv.

5.3.11 VREME TRAJANJA ANALIZE

Značaj elementa vreme, u bilo kojoj analizi granulo sastava ne sme biti zanemaren. U većini pogona za PMS, vreme trajanja analize je najčešće i odlučujući faktor pri izboru instrumenta. Ukoliko je poznato da se mora vršiti veliki broj analiza vreme potrebno za pojedinačne analize je od presudnog značaja.

5.3.12 CENA OPREME I CENA ANALIZE

Pri izboru instrumenata mora se imati u vidu i kapitalna ulaganja u opremu kao i cene pojedinačnih analiza. Neki instrumenti kao što su analizator slike, optički mikroskop, skenirajući elektronski mikroskop, zahtevaju dobro obučeno osoblje za njihovo rukovanje. Cenu školovanja i obuke osoblja treba svakako uračunati u ukupnu cenu analize. U rutinskom radu uhodanim instrumentima i pri optimalnim uslovima za analizu će biti potrebno svega par minuta instrumentalnog rada, imajući na umu školovano osoblje (inženjere, tehničare i laborante) i mesecima obučavano na odgovarajućem instrumentu. Ova ulaganja u osposobljavanje i povremeno inoviranje znanja kadra za proceduru analize, ponekad mogu biti mnogo veća nego cena samog instrumenta. Na kraju se može zaključiti da cena po analizi granulometrijskog sastava raste što je krupnoća čestica koje se analiziraju manja. Odnosno cena analize po uzorku opada sa povećanjem broja analiza.

Širok spektar različitih komercijalnih instrumenata koji se nude na tržištu, predstavlja značajan problem kada treba izabrati i odlučiti se prilikom nabavke.

Tablica 5.19 Količine uzoraka neophodne za pojedine postupke analize

	Metod klasiranja	Masa uzorka	Fluid	Vreme analize
1.	Sedimentacijska vaga Figurovskog	2,5 g (0,1% suspenzija)	1000 ml	1-2 h
2.	Sedimentacijska vaga Sartorius	< 1 g	500 ml	1-5 h
3.	Metoda čaša	≈ 100 g	2000 ml	par sati do par dana
4.	Sabaninijeva natega	5-10 g	1000 ml	20-50 odlivanja
5.	Andreasenova pipeta	0,5-5 % suspenzija	500 ml	par sati
6.	Metoda areometrisanja	50 g	≈ 1000 ml	do par dana
7.	Bahco-ov elutriator	10 g	vazduh	
8.	Blyth-ov elutriator	25 g	Voda	
9.	Haultain-ov elutriator	50 g	Vazduh	
10.	Skenirajući foto sedimentograf	0,1 % suspenzija	200 ml	
11.	Laserski granulometar	0,1 g		< 30 min.

5.3.13 METODE I UREĐAJI PRI GRANULOMETRIJSKOJ ANALIZI ZRNA MALIH PREČNIKA

Tehnike i instrumenti koji se koriste za određivanje granulometrijskog sastava (krupnoću sitnih zrna) mogu se podeliti na osnovu njihovog principa rada na: *direktne*, i *indirektne metode*.

Direktne metode se zasnivaju na merenju geometrijskih veličina koje određuju krupnoću čestica. Analiza granulometrijskog sastava prosejavanjem i merenja mikroskopskim metodama spadaju u ovu grupu. Kod indirektnih metoda, u koje spadaju sedimentacija, elutriacija kao i metode zasnovane na određivanju veličine površina zrna ili neki drugi postupci, karakterizacije sitnih zrna koja zavisi od njegove krupnoće, krupnoća zrna se posredno izračunava koristeći se teorijskim i empirijskim jednačinama.

Druga podela postupaka određivanja krupnoće sitnih zrna mineralne sirovine, izvedena je na grupu diferencijalnih metoda i grupu integralnih metoda. Podela se zasniva na činjenici da se sirovina klasirana po krupnoći i fizički može razčlaniti (na određene klase krupnoće) za eventualna dalja ispitivanja (hemijska, mikroskopska i dr.) za razliku od onih metoda koje sirovinu fizički ne razdvajaju, a gde se klase krupnoće, odnosno granulometrijski sastav, određuju posredno računskim putem.

Tako, metoda sedimentacije sa dekantiranjem zasnovana je na razlici u brzinama slobodnog padanja (taloženja) čestica različite krupnoće u mirnom fluidu (najčešći tečni medijum je voda). Primenjuje se za analizu granulometrijskog sastava uzoraka krupnoće manjih od 0,074 mm, odnosno manjih od 0,038 mm. Ove metode granulometrijskih analiza obuhvataju sve metode određivanja koje se zasnivaju na istom ponašanju zrnastog materijala pri padanju kroz tečni medijum. Stokes-ov zakon definiše brzinu padanja sferične čestice kroz fluid i važi samo za loptasta tela prečnika od 0,2 do 0,0002 mm, tj. samo u slučaju laminarnog kretanja čestica kroz fluid. Zrna prečnika većeg od 0,2 mm kreću se turbulentno, a pri taloženju zrna manjih od 0,0002 mm dolazi do Braunovog kretanja. Prema jednoj drugoj generalizovanoj podeli za čestice manje od 50 μ m kretanje kroz fluid je laminarno, odnosno za čestice veće od 1000 μ m kretanje je turbulentno dok se kretanje čestica između navedenih veličina smatra translatornim.

5.3.14 PRINCIPI SEDIMENTACIJSKE ANALIZE

Prema Stokes-ovom zakonu sferično telo koje pada u nekom fluidu ima brzinu kretanja jednaku rezultujućem kretanju triju sila. Sve tri sile imaju isti pravac, ali su različito smeru delovanja.

Sila Q deluje vertikalno naniže i jednaka je proizvodu mase i ubrzanja sile teže

$$Q = m_m \cdot g$$

gde je:

m_m - masa sferičnog tela koja iznosi

$$m_m = V \cdot \rho_m = (4/3 \pi r^3) \cdot \rho_m$$

r - poluprečnik sferičnog tela

ρ_m - gustina materije sferičnog tela.

Otuda je

$$Q = (4/3 \pi r^3 \cdot \rho_m) \cdot g$$

Sila P predstavlja silu potiska. Poznato je da po Arhimedovom zakonu telo gubi prividno od svoje mase, za onoliko kolika je masa istisnutog fluida. U ovom slučaju ona odgovara masi tečnosti jednako zapremini sferičnog tela.

$$P = m_f \cdot g$$

$$P = (4/3 \pi r^3 \cdot \rho_f) \cdot g$$

gde je:

$$V = 4/3 \pi r^3 \text{ zapremina sferičnog tela}$$

ρ_f - gustina tečnosti - fluida.

Iz toga sledi sila Q pod čijim dejstvom će se vršiti sedimentiranje u fluidu:

$$Q = (m_m - m_f) \cdot g = 4/3 \pi r^3 (\rho_m - \rho_f) \cdot g.$$

Sila F odgovara otporu kretanja čestice u viskoznoj sredini i ona iznosi:

$$F = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot v \cdot r = 3 \pi \eta \cdot d$$

gde je:

η - viskozitet sredine

v - brzina padanja dH/dt

Sferično telo, kao disperzna faza - u pulpi, počinje u jednom momentu da se kreće sa izvesnim ubrzanjem, ali obzirom na svoju zapreminu, odnosno malu masu ubrzanje postaje jednako nuli i sferično telo praktično počinje da se kreće jednom konstantnom brzinom (v_o). Ovo rezultujuće delovanje sila možemo izraziti jednačom:

$$4/3 \pi r^3 (\rho_m - \rho_f) \cdot g = 6 \pi \eta r v_o$$

odnosno

$$4/3 \pi r^3 g (\rho_m - \rho_f) - 6 \pi \eta r v_o = 0$$

odatle je

$$v_o = \frac{4/3 \cdot \pi r^3 \cdot g \cdot (\rho_m - \rho_f)}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r}$$

nakon skraćivanja

$$v_o = \frac{2/3 \cdot r^2 \cdot g \cdot (\rho_m - \rho_f)}{3 \cdot \eta} = \frac{2/9 \cdot r^2 \cdot g \cdot (\rho_m - \rho_f)}{\eta}$$

zamenom $d = 2r$, odnosno $r = d/2$, dobijamo

$$v_o = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_m - \rho_f) \cdot g}{\eta} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \frac{(\rho_m - \rho_f) \cdot g \cdot d^2}{18 \cdot \eta}$$

gornju jednačinu možemo napisati i kao:

$$v_o = \frac{g}{18 \cdot \eta} \cdot (\rho_m - \rho_f) \cdot d^2 = k \cdot (\rho_m - \rho_f) \cdot d^2$$

$$v_o = 545 \cdot (\rho_m - \rho_f) \cdot d^2$$

gde su:

v_o - konačna brzina padanja sferične čestice (cm sec⁻¹)

ρ_m - gustina čvrste faze - minerala (g cm⁻³)

ρ_f - gustina fluida - tečnosti (g cm⁻³)

g - ubrzanje sile teže (981 cm sec⁻²)

η - viskozitet tečnosti (0,1002 g cm⁻¹ sec⁻¹)

d - prečnik sferičnog zrna (cm)

Međutim ako jednačinu rešimo po d , dobija se

$$d^2 = \frac{v_o}{(\rho_m - \rho_f) \cdot g} = \frac{18 \cdot \eta \cdot v_o}{(\rho_m - \rho_f) \cdot g}$$

ako je konačna brzina padanja $v_o = h/v$ za visinu h (cm) i vreme t (sec)

$$d = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta}{(\rho_m - \rho_f) \cdot g}} \cdot \sqrt{\frac{h}{t}}$$

gde je d - prečnik zrna, odnosno krupnoća čestica, istaložen za određeno vreme sedimentacije.

Da bi smo krupnoću zrna (čestica) izrazili u mikrometrima, a vreme sedimentacije u minutima izvrši se sledeća transformacija, tako krupnoću zrna dobijamo u μm , visinu stuba h (cm), a viskozitet $\eta = 0,01002 \text{ g cm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$

$$d = 175 \sqrt{\frac{\eta}{\rho_m - \rho_f}} \cdot \sqrt{\frac{h}{t}}$$

Tako iz predhodnog izraza možemo izraziti i vreme (t) za koje će se istaložiti zrna - čestice određene krupnoće.

$$t = \frac{18 \cdot \eta \cdot h}{(\rho_m \pm \rho_f) \cdot g \cdot d^2}$$

$$t = \frac{\left[175 \cdot \sqrt{\frac{0,01002 \cdot 20}{(\rho_m - 0,998)}} \right]^2}{d^2}$$

gde su:

t - vreme u minutama;

ρ_m - gustina u g/cm^3 ;

d - prečnik u μm .

❖ ❖ ❖

Stokes-ov zakon je izveden pod pretpostavkom da se sferična tela kreću kroz tečnost ili gas neograničenog prostiranja. S obzirom na uslove pri izvođenju analize

sedimentacijom do grešaka pri primeni Stokes-ovog zakona dolazi iz sledećih razloga:

- ♦ Realne čestice materijala nemaju oblik sferičnih tela;
- ♦ Kretanje pojedinog zrna je svakako pod uticajem i drugih prisutnih čestica;
- ♦ Tečnost u sudu za sedimentaciju nije neograničena;
- ♦ Pri proračunu prečnika čestica uzima se prosečna gustina čestica, koja se može razlikovati od stvarne, i
- ♦ Pod dejstvom medijuma za taloženje (najčešće vode) dolazi do interakcije sa česticama koje se talože (bubrenje i slične pojave).

Prvi od navedenih razloga ima presudan uticaj pri sedimentaciji čestica ljuspastog oblika. Utvrđeno je uz pomoć mikroskopa da je stvarna veličina zrna ljuspastog oblika 3,5 do 4 puta veća od veličine određene metodom sedimentacije. Upotrebom velikog suda i relativno male količine uzorka moguće je izbeći uzroke grešaka navedene pod tačkama 2 i 3. Poslednji navedeni uzrok se može izbeći upotrebom organskih nepolarnih tečnosti u kojima ne dolazi do promena na površini zrna pri sedimentaciji.

Na bazi Stokes-ovog zakona zasnivaju se sledeće metode određivanja granulometrijskog sastava sedimentacijom:

- Sedimentaciona vaga Figorovskog
- Sedimentaciona vaga Sartorius
- Metoda Sabanini natege
- Areometrijska metoda po Časagrande-u
- Metoda Anreassen-ove pipete
- Metoda čaša - Beaker decantation metoda po E.J. Robert-u i druge.

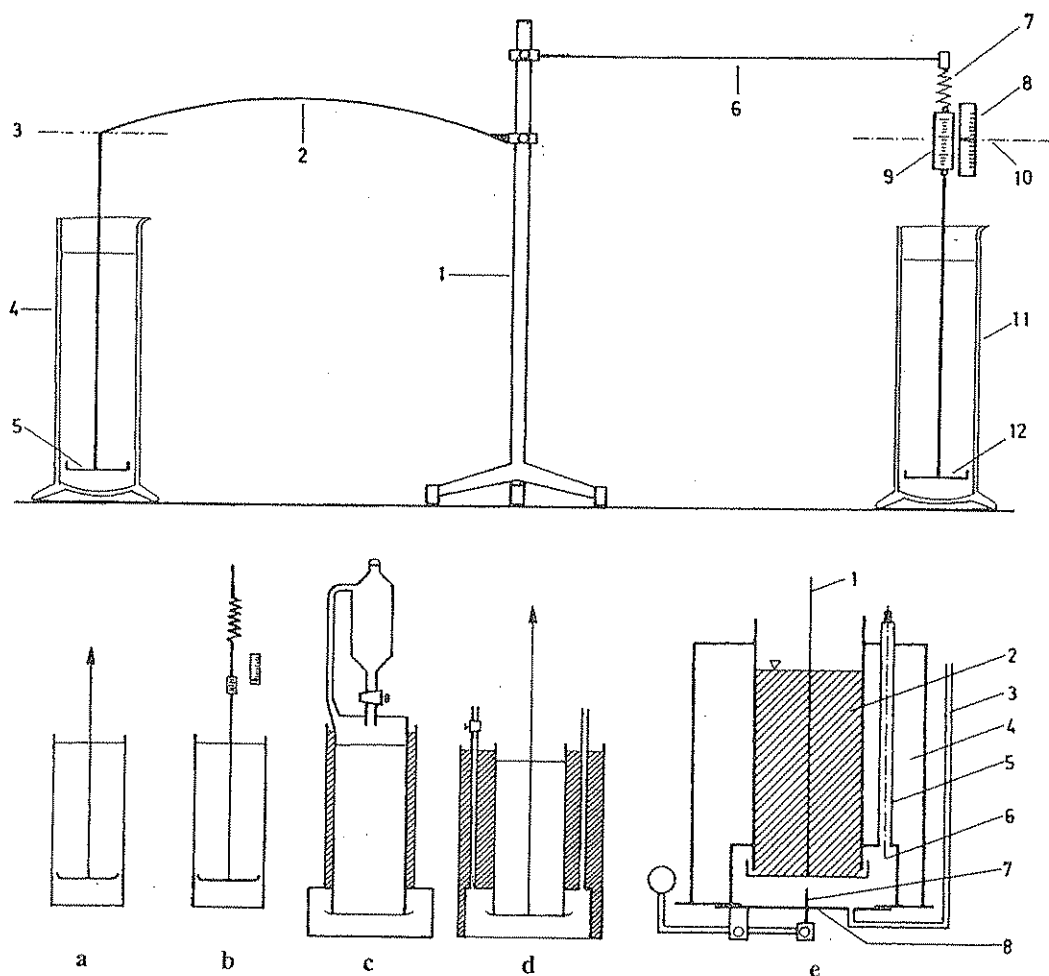
Postoje i novije metode koje se zasnivaju na merenju promene propustljivosti svetlosti kroz suspenziju u zavisnosti od brzine sedimentacije, odnosno veličine čestica, a sve one prikazane su u tablici 5.18.

5.4 ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA SEDIMENTACIJSKIM METODAMA

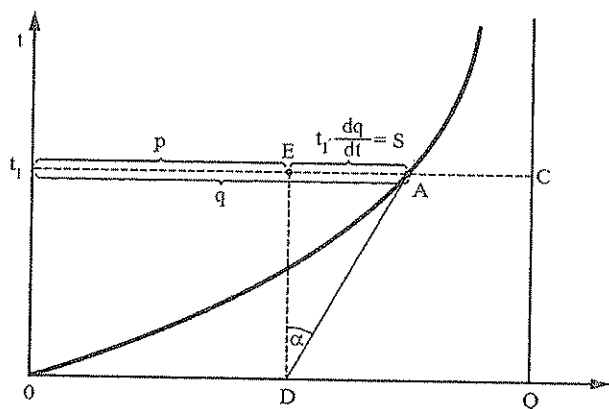
5.4.1 SEDIMENTACIONA VAGA FIGUROVSKOG

Na principima sedimentacije i merenjima nataloženog materijala koji se nagomilava tokom sedimentacije zasniva se čitav niz uređaja, sa različitim tehničkim rešenjima, koji nose imena svojih konstruktora. Tako imamo od najjednostavnijeg uređaja - sedimentometar Figorovskog sa staklenom ili kvarcnom niti (SI.5.17a), sedimentacijsku vagu Figorovskog sa oprugom, Sedimentacijsku vagu sa fotoelektričnom registracijom Rabin-a i Gale-a, sedimentacijsku vagu Bostock-a, sedimentacijsku vagu Leschonski-Sartorius sistema i druge (od kojih ćemo ovu poslednju prikazati detaljnije, s obzirom da su u pitanju samo tehničke varijante samih konstrukcija). Na slici 5.17 prikazano je nekoliko tipova sedimentacijskih vaga.

Tok sedimentacije, tokom vremena t , dat je kumulativnom krivom na grafiku slike 5.18. Da bi se na osnovu kumulativne krive odredili relativni udeli pojedinih klasa krupnoće, neophodno je povlačiti tangente iz tačaka na krivoj, koje odgovaraju datom vremenu taloženja. Odsečki, dobijeni na apscisnoj osi, predstavljaju relativan udeo materijala. Sa grafika slike 5.18 se vidi da se, ukupna količina čestica u suspenziji, koje su prošle kroz sloj H , može izračunati kao $Q = f_{10}$. U određenom vremenskom intervalu broj nataloženih čestica odgovara $p + s$, gde je p - broj čestica, koje imaju brzinu $v = H/t_1$ i s - broj čestica, koje imaju brzinu $v < H/t_1$. Na grafiku je ukupna količina iztalozanih čestica izražena dužinom At_1 , a količina čestica koje nisu sedimentirale, odsečkom AC , ograničenog sa jedne strane krivom sedimentacije, a na drugoj se strani tangencijalno približava kumulativnoj krivoj sedimentacije, do tačke potpunog taloženja svih čestica u suspenziji.



Sl. 5.17 Tipovi sedimentacijskih vaga. **Legenda:** Gore – Sedimentometar Figurovskog sa staklenom ili kvarcnom niti i sedimentacijska vaga Figurovskog sa oprugom (1. Stalak; 2. Staklena nit; 3. Ravnotežni nivo-osa; 4. Menzura; 5. Tas za sedimentaciju; 6. Nosač opruge; 7. Opruga; 8 i 9. Skale nonijusa za merenje; 10. Osa merenja; 11. Tas.) Dole – a. Osnovni tip; b. Vaga Figurovskog; c. Rabatin - Gale-ova vaga; d. Bostock-ova vaga; e. Vaga Leschonski-Sartorius sistema.



Sl. 5.18 Analiza kumulativne krive sedimentacije iz suspenzije

Za određivanje količine (udela) već pomenutih krupnih čestica sa krive sedimentacije, nataloženih za vreme t_1 kroz stub H , i količine sitnih čestica, čija je brzina taloženja $v \leq H/t_1$, neophodno je povući tangentu na krivu u toj tački t_1 . Od tačke preseka tangente na apscisi D , povlačimo liniju paralelnu abscisi, do preseka sa linijom t_1C . Duž DE deli ovu poslednju na dva odsečka: $AE=s$ i $t_1E=p$. Brzina sedimentacije se može izraziti kao $dq/dt = \tan \alpha$. Ovaj izraz određuje sumarnu brzinu talože-

nja, onih klasa krupnoće, koje se u momentu t_1 još uvek nalaze u stanju merenja. Prema tome imamo:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{dq_1}{dt} + \frac{dq_2}{dt} + \dots = \sum \frac{dq_i}{dt}$$

Očigledno da će od početka taloženja do vremena t brzina sedimentacije, za datu krupnoću čestica, biti nepromenjena. Količina čestica datih dimenzija napadalih za određeni period je

$$s = t_1 \cdot \frac{dq}{dt}$$

A pošto je $q = p + s$, sledi $p = q - t_1 (dq/dt)$. Razmotrimo trougao ADE , vidimo da je

$$AE = s = DE \tan \alpha$$

odnosno

$$p = q \cdot AE = t_1 E.$$

Na taj način, apscisa svake tačke na kumulativnoj krivoj odražava količinu udeo materijala koji se nataložio za vreme t . Pošto je poslednja tačka na krivoj, pri kojoj je izvršena sedimentacija svih čestica, uzeta kao 100 %, to se količina (udeo) iztaloženog materijala u nekom vremenskom intervalu može iskazati kao procentualni deo od ukupne količine. Postupak iscrtavanja kumulativne

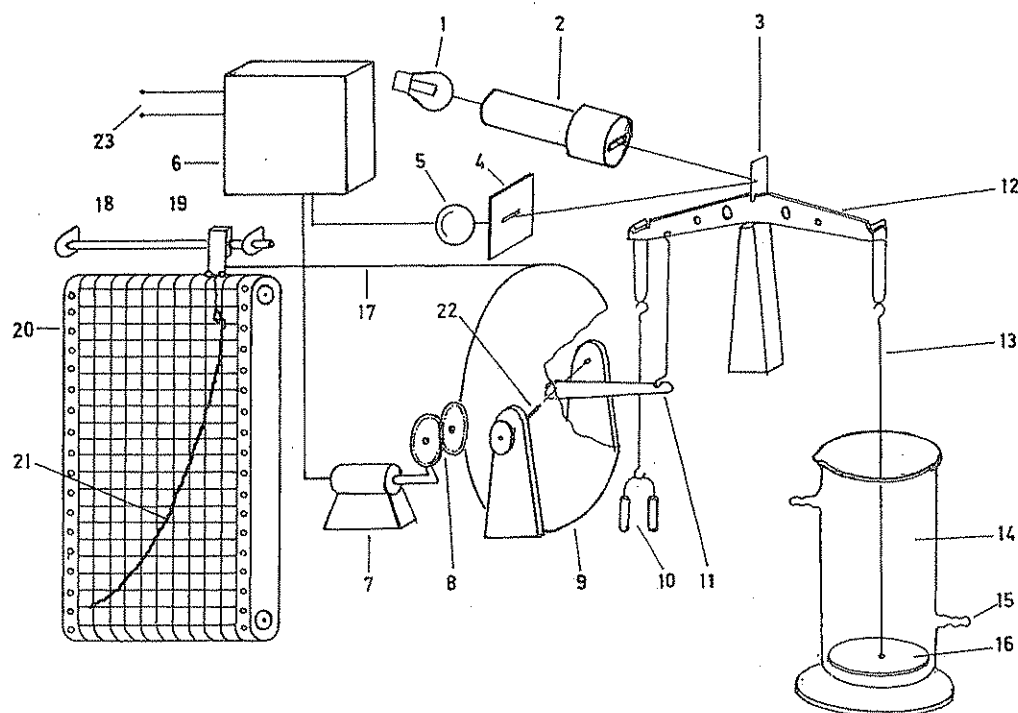
krive granulo sastava je prema tome isti kao i kod iscrtavanja krivih dobijenih sitovnom analizom.

5.4.2 SEDIMENTACIONA VAGA SARTORIUS

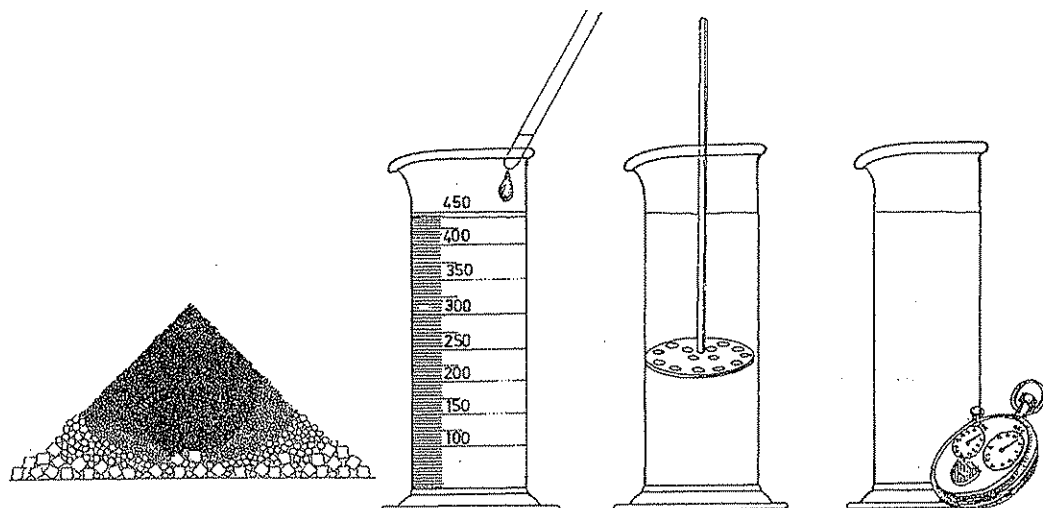
Sedimentaciona vaga je uređaj koji omogućava automatsko registrovanje mase istaloženog materijala u zavisnosti od vremena sedimentacije. Sedimentacijska vaga tipa "Sartorius-4600" je pogodna za utvrđivanje granulometrijskog sastava uzoraka (sirovine ili proizvoda PMS) čiji je raspon krupnoće od 1-60 μm , a primenom tečnosti (disperznog sredstva) za sedimentiranje većeg viskoziteta raspon krupnoće može da se proširi i do 150

μm . Izgled sedimentacione vage "Sartorius-4600" prikazan je na slici 5.19.

Vaga radi na principu taloženja zrna po Stokes-ovom zakonu i ispitivanjima Oden-a. Uređaj registruje porast mase uzorka na tasu u menzuri koji se sedimentira u funkciji vremena. Postignuta osetljivost je takva da se za svakih 2 mg istaloženog materijala na tasu u menzuri automatski uključuje i registruje horizontalni pomak pera pisača preko papira za 0,08 cm. Na taj način se registruje porast mase čestica određene krupnoće na tasu u menzuri tokom vremena sedimentiranja. Istovremeno se na beskonačnoj traci papira iscrtava kumulativna kriva odseva na osnovu čega će se računskim putem utvrditi učešće pojedinačnih klasa krupnoće, odnosno



Sl. 5.19 Sedimentacijska vaga "Sartorius-4600". 1.Izvor svetlosti; 2.Optički sistem za fokusiranje svetlosnog snopa; 3.Ogledalo; 4.Dijafagma; 5.Fotočelija; 6.Transformator; 7.Torziona poluga vezana za torzionu osovinu; 8.Protiv-tegovi; 9.Menzura sa dvostrukim zidovima; 10.Tas za sedimentaciju; 11.Kraci terazija; 12.Sistemi zupčastih prenosnika-regulatora; 13.Elektromotor sa relejima; 14.Pisač; 15.Beskonačna papirna traka; 16.Sistem za pomeranje i regulisanje brzine kretanja papirne trake.



Sl. 5.20 Priprema i homogeniziranje suspenzije za sedimentacijsku analizu.

granulometrijski sastav. Za određivanje količine uzorka (disperzne faze) neophodno je poznavati: gustinu uzorka, koji ćemo odrediti piknometrom; neophodno je poznavati mineraloške i hemijske osobine materijala (u pogledu rastvorljivosti, bubrenja, poroznosti i drugih osobina). Kako je širina papirne trake za registraciju 20 cm, a svaki korak - horizontalni pomak papira 0,08 cm sledi da na toj širini može da bude registrovano 250 koraka, odnosno 250 koraka $\times$ 2 mg = 500 mg. Tako se masa uzorka uzima prema obrascu:

$$E = \frac{500 \cdot d_k}{d_k - d_f} \text{ (mg)}$$

gde je:

- E - količina uzorka za analizu;
- d_k - gustina materijala, čvrste faze;
- d_f - gustina medijuma, vode.

Izmerena količina uzorka se prenosi u sud za sedimentaciju. Granična masa koju vaga može da registruje pri ovoj sedimentaciji iznosi 500 mg. Odvaga može, kao što se vidi iz gornjeg obrasca da bude i veća. S obzirom na sile potiska koje deluju pri taloženju sedimentirana količina neće preći 500 mg, ako se uzorak odmeri u količini izračunatoj na osnovu gornjeg obrasca. Homogeniziranje suspenzije se postiže naizmeničnim pomeranjem tase gore - dole.

Priprema medijuma, homogenizacija i tok izvođenja analize. Pri izvođenju sedimentacione analize uzroci grešaka mogu da budu pored ostalog i rastvoreni ili adsorbovani gasovi u tečnosti kao i mehurići na samom materijalu. Zato sud za taloženje ima poseban dodatak koji omogućava priključivanje na vakum pumpu i evakuiranje sedimenta i tečnosti. Kada je homogeniziranje završeno tas vage se brzo okači na kukicu i uključi u rad motor za pomeranje papira.

Kako je tas vage, na koji se talože čestice materijala, manji za 1,2 mm od unutrašnjeg prečnika menzure u koju je smešten, to se deo materijala taloži na dno menzure,

a ne na sam tas. Ova količina iznosi oko 3 % od ukupne, polazne mase uzorka. Jedan deo dispergovanog uzorka u supenziji ostaje ispod tase, već na samom početku eksperimenta odnosno u toku homogenizacije. Tako da su za obračun uzeti ukupni gubici od 6 % od polaznog uzorka materijala. Kako mineralna zrna uglavnom nisu sferična, već odgovarajući ekvivalenti, to će i rezultati imati relativne vrednosti. Za zrna istih geometrijskih formi, a različitih gustina (polimineralne sirovine), dobijaće se ekvivalentni prečnici.

Disperžno sredstvo - fluid. Preporučljivo je da se radi sa visinom stuba fluida od 20 cm, odnosno 500 cm³ tečnosti, mada se sedimentacija može izvesti i na 10 ili 5 cm visine stuba, ako je u pitanju izuzetno fini prah, čime se vreme taloženja za istu odvagu uzorka skraćuje. Za uspešan rad uslov je da primenjeni fluid ne reaguje sa materijalom koji se ispituje, da mu je poznata gustina d_f i viskozitet η .

Kod izbora tečnosti voditi računa o sledećem:

- ♦ Materijal ne sme da se rastvara u tečnosti. Ako je rastvorljivost materijala mala ili neznatna u zavisnosti od temperature, sedimentaciju vršiti u zasićenom rastvoru.
- ♦ Materijal ne sme da bubri, da se skuplja ili upija tečnost.
- ♦ Materijal ne sme da aglomerira (flokurira, koaguliše) te se u tom cilju dodaju odgovarajući antikoagulanti, peptizatori čije količine treba predhodno eksperimentalno utvrditi.
- ♦ Tečnost ne sme da isparava.

U tablici 5.20 dat je jedan broj raspoloživih tečnosti, odgovarajućih koncentracija, sa podacima o viskozitetu i njihovoj gustini. U drugoj tablici 5.21 naveden je niz materijala i minerala sa primerima izbora odgovarajućih fluida, u kojima može da se vrši sedimentacija, kao i odgovarajući disperganti, soli i druga površinski aktivna organska hemijska jedinjenja sa odgovarajućom koncentracijom.

Tablica 5.20 Karakteristike najčešće korišćenih tečnosti

Tečnost	Viskozitet η u cP	Gustina ρ_f u g/cm ³
Destilovana voda	1,002	0,998
Aceton	0,332	0,7906
N-amil alkohol	5,11	0,8210
Etil alkohol	1,118	0,7892
Etilen glikol/dest.voda 1:9	1,3069	1,0114
Etilen glikol/dest.voda 3:7	2,4067	1,0342
Etilen glikol/dest.voda 7:3	7,170	1,0813
Benzen	0,6473	0,8788
N-Butanol	2,93	0,8099
1,4 Butylen glikol/dest.voda	7,145	1,0149
Cikloheksanon/cikloheksanol 9:1	2,8296	0,9454
Cikloheksanon/cikloheksanol 6:4	4,7639	0,9445
Cikloheksanon/cikloheksanol 5:5	6,2655	0,9448
Glicerol/dest.voda 1:9	1,4652	1,0260
Glicerol/dest.voda 3:7	2,9412	1,0786
Glicerol/dest.voda 1:1	7,3367	1,1309
Izobutil alkohol	4,034	0,8027
Izopropil alkohol	2,4320	0,78505
Metanol	0,5916	0,7923

Tablica 5.21 Izbor medijuma i antikoagulanata za pojedine materijale

Materijal ili sirovina	Medijum	Disperzno sredstvo	Molaritet dispergatora
Aluminijumoksid	Voda	Na-pirofosfat	0,001-0,003
Samotno brašno	Voda	Na-pirofosfat	0,002
Feldspat	Destilovana voda	—	—
Gips	Etilenglikol+abs. alkohol	Citrat	0,005
Grafit	Dest. voda	Na-linoleat	0,5 %
Krečnjak	Voda	Na-pirofosfat	0,002
Kaolin	Voda	Na-pirofosfat	0,002
Magnezit	Voda	Na-pirofosfat	0,002
Potrland cement	Etilen glikol	CaCl ₂	0,0005-0,002
Fosfati	Voda	Na-pirofosfat	0,002
Talk	Voda	Na-pirofosfat	0,002

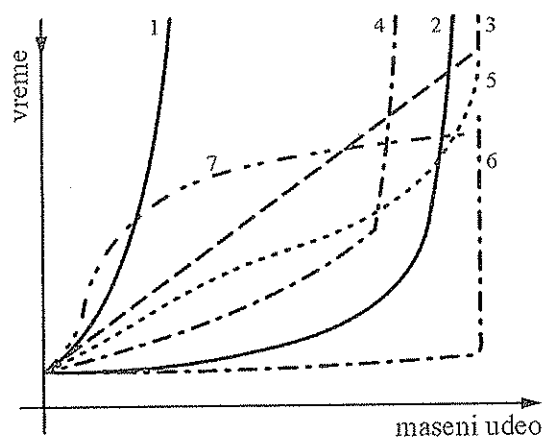
Najčešće primenjivani antikoagulant, koji se dodaju destilovanoj vodi kao sedimentacijskoj tečnosti se koriste:

- ♦ 10 % rastvor natrijumsilikata Na_2SiO_3 ("vodenog stakla")
- ♦ 1,9 g natrijumortofosfata $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$
- ♦ 2,23 g natrijupirofosfata $\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$
- ♦ 1,87 g aluminijumnitrata $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$.

Podaci odgovaraju visini vodenog stuba kod sedimentacije, od 20 cm ili zapremini od 500 cm³.

Iz poznate brzine pomaka papira na pisaču i prednog puta papira određuje se vreme sedimentacije. Dobijena kriva se primenom Stokes-ovog zakona i klasičnih izvođenja Oden-a obrađuje tako da se dobija kriva raspodele veličine čestica. Brzina kretanja papira se reguliše prema veličini čestica materijala, koje se očekuju, i ona može da iznosi: 30, 60, 120, 300, 600, 1200 i 2400 mm/h.

Na dijagramu je u principu moguće dobiti sledeće karakteristične kumulativne krive nastale tokom sedimentacije materijala različitog granulosastava, prikazane su na slici 5.21.



Sl. 5.21 Tipične kumulativne krive određene sedimentacijskom vagom.

• Kriva 1 odgovara finim zrnima. Preporučuje se upotreba tečnosti za sedimentiranje manje gustine i viskozitet.

• Kriva 2 odgovara grubim zrnima. Potrebno je upotrebiti tečnosti za sedimentiranje veće gustine viskozitet.

• Kriva 3 odgovara uskom opsegu raspodele zrna. Nagib krive se može promeniti promenom tečnosti za sedimentaciju i brzine pomeranja papira.

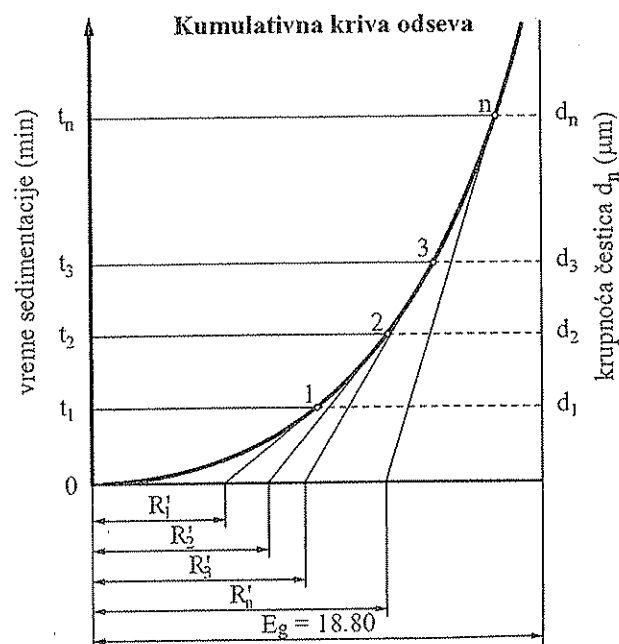
• Kriva 4 odgovara raspodeli sa dva maksimuma. Promena nagiba krive se može postići samo promenom brzine pomeranja papira.

• Kriva 5 odgovara koagulaciji taloga. Tipičan je S oblik krive. Obrada ovakve krive daje pogrešnu sliku o raspodeli. Koagulacija se može izbeći promenom tečnosti za sedimentiranje ili dodavanjem odgovarajućeg pep-tizatora.

• Kriva 6 odgovara primeni sredstava za flokulaciju. Za najkraće moguće vreme postiže se maksimalna sedimentacija.

• Kriva 7 odgovara praćenju rasta kristala iz zasićenog rastvora pri ravnomernom hlađenju.

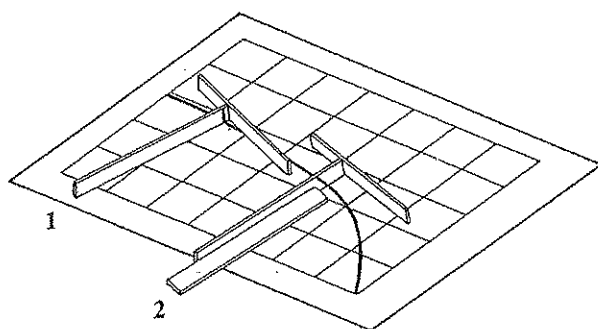
Obrada eksperimentalno dobijene kumulativne krive može da se vrši na dva načina: računskim putem sa tabelarnim prikazom rezultata i grafičkim putem. Grafički postupak obrade, koji se zasniva na izvođenjima Oden-a je brz, relativno lak, široko rasprostranjen i dovoljno tačan.



Sl.5.22 Kumulativna kriva i način očitavanja vrednosti

Na slici 5.22 prikazana je kumulativna kriva – grafički prikaz rezultata merenja na beskonačnoj traci sedimentacijske vage. Na ordinati se registruje vreme sedimentacije u minutima, na apscisi se registruje količina sedimentiranog materijala koji se na ukupnoj dužini od 18,80 cm istaloži 100 %.

Konstrukcijom tangente u tački u kojoj za izračunato vreme t , odnosno zadatu krupnoću zrna d_n , i njenim presekom sa osom apscise određuje se odsečak R'_n . Pri postavljanju tangenti koristimo specijalni T-lenjir sa vertikalno postavljenim krakima koji su napravljeni od ogledala kako bi se lakše postavila normala u datoj tački, odnosno tangenta na krivu. (Sl.5.23)



Sl.5.23 Pribor i način postavljanja tangente u datoj tački na kumulativnoj krivoj: 1–nepravilno postavljen lenjir–normala na tangentu; 2–ispravno postavljen T-lenjir.

Postupak očitavanja sa grafika kumulativne krive. Iz proporcije

$$18,80 \text{ cm} : R'_n = 100 \% : R_n$$

sledi da je

Tablica 5.22 Prikaz izračunavanja granulometrijskog sastava

Zadati prečnik $d_n, \mu\text{m}$	$d_n^2, \mu\text{m}^2$	Računa se $t',$ min	Meri se R'_n	Izračunava se $R_n = (R'_n \cdot 100) / 18,80$ (odnosno) $\downarrow \geq M, \%$	Maseni udeo pojedinačnih klasa
$>d_1, \text{max}$		t_1	R'_1	$R_1 = (R'_1 \cdot 100) / 18,80$	R_1
$>d_2$		t_2	R'_2	$R_2 = (R'_2 \cdot 100) / 18,80$	$R_2 - R_1$
$>d_3$		t_3	R'_3	$R_3 = (R'_3 \cdot 100) / 18,80$	$R_3 - R_2$
...	...	...	...	...	...
$>d_n$		t_n	R'_n	100,00	$R_n - R_{n-1}$
Ulaz: 38+0,1mm				—	100,00

$$* t = \frac{175^2 \cdot \eta \cdot h}{\rho_m - \rho_f} = \frac{175^2 \cdot 0,01002 \cdot 20}{\rho - 0,998} \text{ (min)}$$

gde su:

t - vreme u minutima

ρ_m - gustina materijala (g/cm^3)

ρ_f - gustina destilovane vode $0,998 \text{ g}/\text{cm}^3$

η - viskozitet $0,01002 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$ ($=1,002 \text{ cP}$)

h - visina stuba 20 cm

d - prečnik zrna μm

$$R_n = \frac{R'_n \cdot 100}{E_g} = \frac{R'_n \cdot 100}{18,80} (\%)$$

gde su

$$R'_n = G - \frac{\Delta G}{\Delta T} \cdot t \quad \Delta T = \frac{\Delta t}{n} \quad \Delta G = 0,08 \text{ cm}$$

gde su:

R'_n - vrednost ostatka na apscisnoj osi;

G - nataloženi materijal za vreme t odnosno utvrđena masa materijala na tasu

t - posmatrana tačka na apscisnoj osi;

ΔG - priraštaj mase sedimentiranog materijala za jedinični korak;

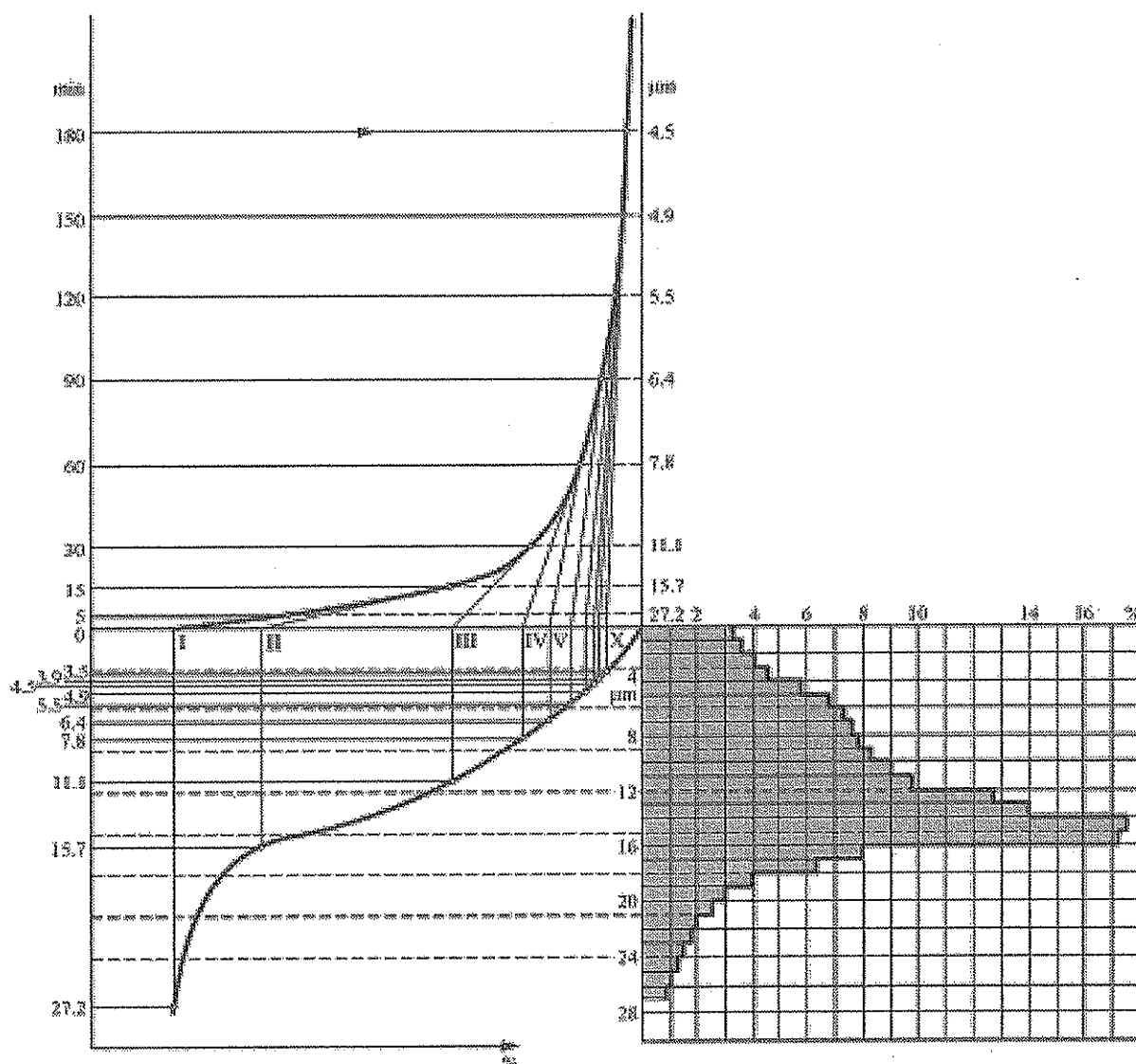
Δt - vreme za koje je sledio priraštaj mase ΔG , za jedan korak;

n - broj koraka u vremenu Δt ;

E_g - širina trake.

Sa grafika kumulativne krive odseva se za date granične prečnike d_n očitava vreme sedimentacije t u minutima. Odnosno, što su češći slučajevi, za zadatu krupnoću zrna d_n , njegov prečnik izračunava se odgovarajuće vreme sedimentacije. Na ordinati grafika (t_n) označiti izračunata vremena za željene granične prečnike krupnoće materijala, i iz tih tačaka povući paralele apscisi do preseka sa kumulativnom krivom na grafiku. U dobijenim tačkama povući tangente do preseka sa apscisom. Izmeriti duži R'_n (od 0 do odgovarajuće vrednosti R'_n) na apscisi i odgovarajuće vrednosti zameniti u obrazac $R_n = (R'_n \cdot 100) / 18,80$ i dobija se kumulativna vrednost proseka za datu krupnoću zrna d_n (Tablica 5.22).

Prikaz grafičkog rešavanja i dobijanja histograma (direktne krive) distribucije pojedinačnih krupnoća analizirane sirovine dat je na slici 5.24.



Sl.5.24 Grafički prikaz dobijanja direktne krive granulometrijskog sastava uzorka datog u vidu histograma distribucije zrna određene krupnoće (klase krupnoće) i njihov maseni udeo (frekvencija) u %.

5.4.3 SEDIMENTACIONA ANALIZA METODOM ČAŠA - BEAKER DECANTATION METHOD

Jedan od najčešće korišćenih postupaka određivanja granulometrijskog sastava sirovine je svakako metoda "beaker decantation" koju je predložio dr E.J.Robert (1953.godine). Za izvođenje analize potrebna su dva pehara od po 2 l i pet ili više pehara zapremine 1 l, stakleni štap dužin 30 cm sa gumom na jednom kraju, štoperica i mehanička mešalica. Analiza se izvodi u fluidu, najčešće vodi. Masa uzorka može da bude najviše 100g. Shodno mineralnom sastavu sirovine izabrati jedan od minerala (ukoliko se radi o polimineralnoj sirovini) prema kome će da se vrši klasiranje, odnosno izračuna konačna brzina padanja i vreme sedimentacije. Odabrani mineral prema čijoj gustini se viši proračun može biti mineral čija je zastupljenost u uzorku najveća ili mineral čija se raspodela čestica po krupnoći želi da prati. Predvideti klase krupnoće nastojeći da iste budu (ukoliko je to potrebno) u opadanju $\sqrt{2}$.

U čaše A, C, D, E, F i G nalije se voda do oko 2/3 visine; čaša B je prazna. U sve pehare se doda antikoagulant odgovarajuće koncentracije. Analiza počinje sa izdvajanjem

najkrupnije klase krupnoće. Uzorak se izmeša staklenim štapićem i kada se suspenzija umiri, prestanu vrtloženja, otpočine se sa merenjem vremena t_1 ($t_1 = H_1/v_0 \times 1,05$). Istovremeno se, u trajanju od 10 sekundi, štapićem sa gumom blago udara po zidovima pehara izazivajući na taj način vibracije koje će sprečiti taloženje čestica na zidove. U momentu isteka vremena t_1 suspenzija se odliva iz pehara A u pehar B, dok na dnu pehara A ostaje talog.

U peharu A će se nalaziti zrna prečnika $\geq d$ sa reduciranom količinom sitnijih zrna u odnosu na prvo dekantiranje. Zatim se voda iz pehara C prelije preko taloga u peharu A, izmeri nova visina suspenzije H_2 izračuna novo vreme sedimentiranja t_2 ($t_2 = H_2/v_0 \times 1,05$) za istu klasu krupnoće. Naime ovim postupkom se vrši dalje ispiranje zaostalih sitnijih čestica zahvaćenih krupnijim. Suspenzija se dobro homogenizira i pusti da taloži za vreme t_2 . U momentu isteka vremena dekantira se u pehar C suspenzija sa zrnima prečnika $< d$ dok na dnu pehara A ostaje talog. Postupak ispiranja vrši se i sa narednim peharima D, E, F i G po opisanom postupku. Postupak produžavati dotle dok se vodeni stub ne razbistri. Time je izvršeno izdvajanje najkrupnije klase krupnoće. U peharima B, C, D, E, F i G se nalaze čestice $< d_1$. Sa

poslednjim odlivanjem dobiće se tražena klasa krupnoće $>d$ u peharu A, koju filtriramo, sušimo i merimo.

U koliko se ide na dalje klasiranje, uzima se pehar B, ukoliko je potrebno doliva se suspenzija iz pehara C, izmeri nova visina suspenzije H_3 (u mm) i izračuna vreme sedimentiranja zrna prečnika $d/\sqrt{2}$ ($t_3 = H_3/v_2 \cdot 1,05$). Suspenziju homogenizirati i ostaviti da sedimentira za vreme t_3 , nakon isteka vremena taloženja dekantirati zrna prečnika $<d/\sqrt{2}$ u slobodni pehar A. U peharu B ostaće zrna prečnika $d+d/\sqrt{2}$ i izvesna količina zrna prečnika $<d/\sqrt{2}$. U pehar B presuti suspenziju iz pehara C, izmeriti visinu i homogenizirati je. Po isteku izračunatog vremena taloženja odliti zrna prečnika $<d/\sqrt{2}$ u pehar C. Sa poslednjim odlivanjem u peharu B se dobija klasa krupnoće $\geq d/\sqrt{2}$, a u ostalim peharima zrna čija je krupnoća $\leq d/\sqrt{2}$.

5.4.4 SEDIMENTACIJSKA ANALIZA – SABANINI METOD

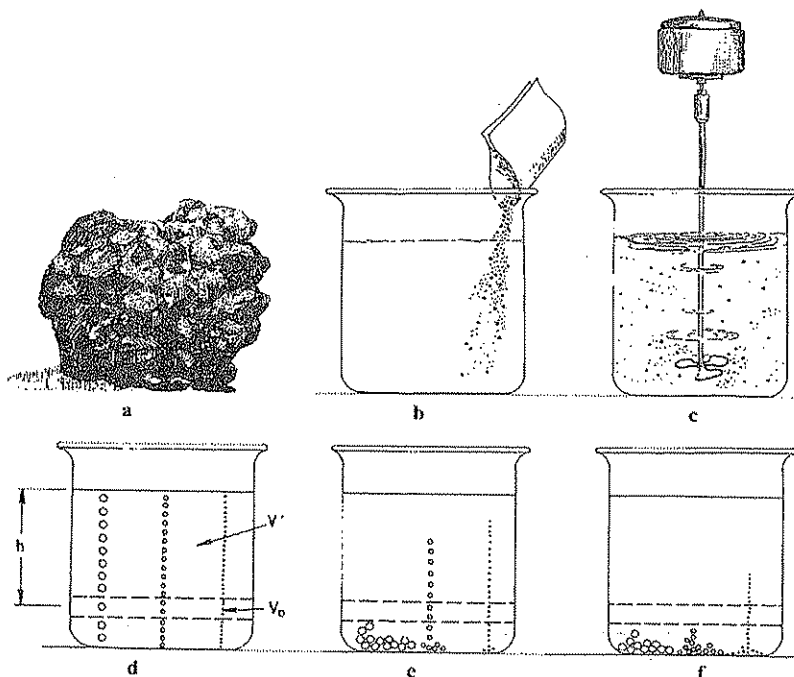
Metoda sedimentacije u menzuri i dekantacije Sabanini-jevom nategom zasnovana je na različitim brzinama slobodnog padanja čestica različite krupnoće u mirnom fluidu (najčešće vode). Primenjuje se za analizu granulometrijskog sastava uzoraka krupnoće manje od 0,074 mm, odnosno 0,038 mm.

Ako u menzuri napunjenoj vodom pustimo da padaju čestice različite krupnoće, nakon izvesnog vremena, krupnije čestice će biće istaložene na dno menzure, a sitnije, zbog manje brzine taloženja, nalaziće se u suspenziji. Odlivanjem (dekantacijom) suspenzije vrši se izdvajanje odgovarajuće klase krupnoće (sitnijih čestica). Za izvođenje ove analize određuje se brzina slobodnog padanja

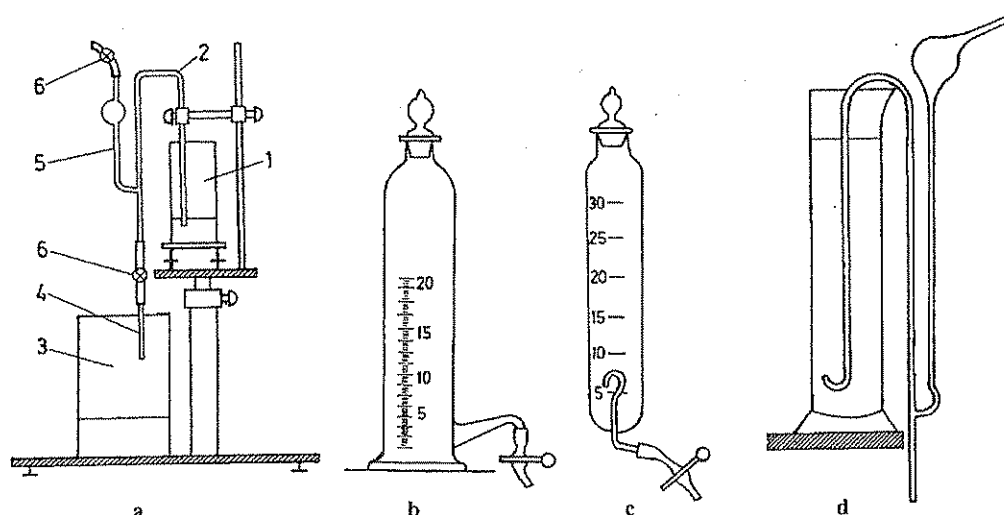
po Stokes-ovom zakonu na osnovu čega se izračunava vreme sedimentacije t koje je potrebno za izdvajanje klase krupnoće $<d$. Izvođenju analize predhodi određivanje raspona klase krupnoće koje će se izdvajati sedimentacijom i izračunavanje neophodnog vremena za izdvajanje pojedinih klase krupnoće, na bazi izmerene visine odlivanja H . Sedimentaciona analiza priborom Sabanini-a izvodi se u menzuri zapremine 1000 cm³. Za brzo odlivanje (dekantaciju) koristi se Sabanini-jeva natega. Na slici 5.26 prikazan je izgled Sabanini-jeve natega u menzuri, različitih konstrukcija.

Postupak analize. Analiza se izvodi na sledeći način: uzorak mase 10 g sipa se u menzuru i ista napuni vodom do crte od 1000 ml. Da bi se otklonile greške koje mogu da nastanu zbog eventualne flokulacije, u menzuru se dodaje određena količina 10 %-tnog rastvora Na_2SiO_3 (vođeno staklo).

Analiza započinje sa izdvajanjem najfinije klase – d_1+0 . Uzorak zajedno sa vodom, dobro se homogenizira i ostavi da sedimentira za vreme t_1 . Nakon isteka vremena t_1 , u stubu suspenzije visine H nalaze se samo čestice krupnoće $-d_1$. Oko 10 sekundi pre isteka vreme na taloženja, pažljivo se spušta Sabanini-eva natega u menzuru, koja je tako konstruisana da joj otvor bude iznad taloga obrazovanog u menzuri. U momentu isteka vremena taloženja dekantira se suspenzija izvlačenjem pomoću natega u veći sud. Na ovaj način su dobijene dve klase krupnoće, talog – kao krupniju klasu i neistaložen deo kao sitniju klasu. Vreme trajanja taloženja, u zavisnosti od gustine minerala, određuje granične prečnike čestica, odnosno klase krupnoće. Prvim odlivanjem nisu izdvojene sve čestice koje su sitnije od d_1 , iz sledećih razloga: sve čestice krupnoće $-d_1$ nisu započele padanje sa gornjeg nivoa suspenzije A–A. Čestice krupnoće $-d_1$ koje su započele padanje ispod tog nivoa, nakon vremena t_1 , naći će se ispod nivoa odliva nja B–B i pri tom od-



Sl.5.25 Postupak pripreme i izvođenja analize pomoću čaša – pehara. Legenda: a–uzorak; b–kvašenje; c–homogenizacija; d–stub homogenizirane suspenzije visine h , brzina padanja v' i zona konačne brzine padanja v_0 ; e–ilustracija brzine sedimentiranja zrna različite krupnoće; f–zadržana zrna sitnijih klase krupnoće u talogu.



Sl. 5.26 Pribori za izvođenje sedimentacijske analize – odmućivanjem, metoda Sabanini-jeve natege sa menzurom. **Legenda:** a. Preteča pribora Sabaninija; b. Pribor Aterberga; c. Pribor Markiza; d. Pribor Vanšafe koji su kasnije usavršili Sabanini i Šneron.

livanju neće biti izdvojene. Iz tih razloga se menzura ponovo napuni vodom do određene crte, suspenzija dobro homogenizira, a odlivanje iste klase krupnoće ponavlja više puta, sve dok se ne izdvoje sve čestice krupnoće $-d_1$. Naime, vrši se "ispiranje" čak i više desetina puta (20 do 50 odlivanja). Odgovarajuća klasa krupnoće je dobro izdvojena kada u stubu tečnosti visine H , nakon vremena sedimentacije t_1 , nema više čestica. Postupak dolivanja i dekantiranja se ponavlja sve dok se ne dobije talog i bistra voda. Nakon toga klasa $-d_1+0$ se filtrira i suši, odnosno započinje se izdvajanje sledeće krupnije klase čestica $-d_2+d_1$. Nakrupnija klasa $-d_n+d_{n-1}$, pri odlivanju klase $-d_{n-1}+d_{n-2}$, ostaje na dnu menzure. Sedimentaciona analiza metodom Sabanini-ja daje direktne rezultate o udelima pojedinih klasa krupnoće ali samo za homogene uzorke, u kojima sve čestice imaju istu gustinu. Kod ruda koje se sastoje od dva ili više minerala uzima se gustina same sirovine (a kasnije izračunavaju preko koeficijenta jednakog padanja dimenzije čestica različitih minerala u izdvojenim klasama).

Kada minerali figuriraju u vidu slobodnih čestica (što je kod krupnoće uzoraka za sedimentacijsku analizu češći slučaj) vreme taloženja se izračunava na bazi gustine onog minerala koji je u rudi najviše zastupljen ili za mineral koji nas konkretno interesuje. Minerali se u tom slučaju zaista razvrstavaju po označenim klasama krupnoće, dok se čestice drugih minerala izdvajaju u pojedine klase prema jednakim bzinama padanja računskim postupkom. Sedimentaciona analiza pomoću Sabanini pribora traje dosta dugo, zbog velikog broja odlivanja jedne klase i dugog vremena sedimentiranja, naročito kod sitnih klasa.

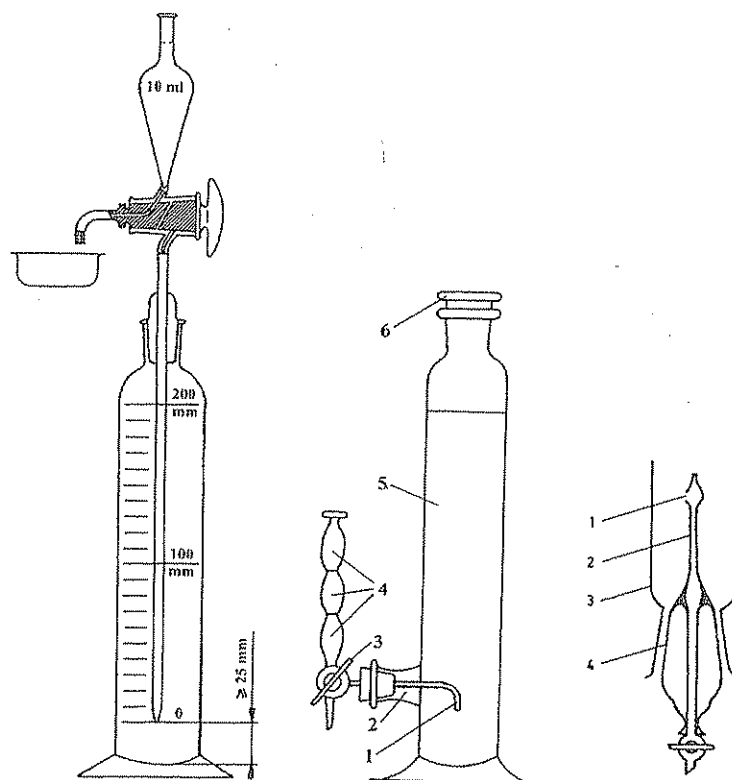
(Jasjukevič, 1949. u svojoj knjizi, u delu gde obrađuje klasiranje, piše "...metodom sedimentacije (odmućivanja) sitno izmlevenih tvrdih abraziva (korund, almandin i dr.) dobijaju se gotovi proizvodi, poznati pod nazivom "minutnici", koji se upotrebljavaju za brušenje i poliranje minerala. Svaku klasu "minutnika" karakteriše njegova brzina taloženja (odmućivanja) u minutama i predstavlja materijal koji se sastoji od zrna između uskih granica razmera, potpuno pogodnih za glačanje...").

5.4.5 METODA PIPETIRANJA PO ANDREASEN-BORNER-U

Određivanje granulometrijskog sastava materijala metodom Andreasen - Borner-a takođe spada u grupu diferencijalnih metoda. Ova metoda se zasniva na istom principu kao i sedimentaciona vaga, samo što se ovde brzina taloženja ne registruje automatski i kontinualno. Brzina taloženja pojedinih klasa krupnoće izvodi se pomoću Andreasen-ove pipete prikazane na slici 5.27.

Suššina metoda pipetiranja je da se postupno izdvajaju uzorci suspenzije tačno utvrđene zapremine sa određene dubine stuba suspenzije, u unapred izračunatom vremenu, a kasnije utvrđuje masa čvrste faze u ispitivanim uzorcima i izračunava granulometrijski sastav. Masa osušenog uzorka (čvrste faze) izražava se u % od ukupne mase (čvrste faze) u nultoj probi (izdvojene suspenzije i izračunatih vrednosti sadržaja čvrste faze u momentu odpočinjanja sedimentacije) i karakteriše maseni udeo čestica sa graničnim prečnikom koje padaju sa visine H u datom momentu t_j .

Andreasen-ova pipeta je cilindričan sud zapremine oko 500 ml. Menzura se zatvara šlifovanim zapušačem na kome se nalazi otvor za regulisanje pritiska u cilindru, i kroz koji prolazi cev pipete. Iznad zapušača se nalazi specijalna slavina sa dva paralelna otvora. Pomoću jednog od njih se suspenzija iz pipete laganim usisavanjem prevodi u mali rezervoar (10 ml) kruškastog oblika koji se nalazi iznad slavine. Okretanjem slavine kroz drugi otvor se ispušta suspenzija iz rezervoara u posudicu za merenje. Sam cilindar (menzura) je graduisan i posle svakog pipetiranja može da se očitava visina nivoa suspenzije, odnosno visina sa koje padaju čestice. Visina suspenzije obično opada za po 3 mm pri svakom odsisavanju (pipetiranju), što se mora uzeti u obzir pri proračunu vremena taloženja, odnosno vremenskih intervala u kojima se vrši pipetiranje. Obično se pravi 1-5 % -tna suspenzija, zavisno od gustine (ρ_m) ispitivanog uzorka. Ukoliko je gustina manja, pravi se reda suspenzija jer sediment zauzima veću zapreminu, što dovodi do grešaka pri izdvajanju materijala. Suspenziji se kao antiokoagulans dodaje najčešće određena količina vodenog stakla, kao i kod drugih sedimentacijskih metoda.



Sl. 5.27 Pribori za određivanje granulometrijskog sastava metodom pipetiranja. Legenda: a. Andreasen-ova pipeta; b. Pipeta Andreasen-Ajzenvejn; c. Pipeta PP-1 LIOT (Lenjingradski institut)

Izvođenje analize. Suspenzija se naspe u menzuru za taloženje zatvori i dobro homogenizira. Najpre se odpipetira tzv. nulta proba, za koju se pretpostavlja da sadrži čestice svih klasa krupnoće i koja služi kao osnov za izračunavanje procentualnog udela pojedinačnih klasa krupnoće. Istog trenutka se uključi štoperica za merenje vremena sedimentacije. Po isteku izračunatog vremena za datu klasu krupnoće, iz menzure se odpipetira ista količina suspenzije da bi se iz rezervoara ispustila u predhodno osušene i izmerene posudice od porcelana. Nakon sušenja na 105°C do konstantne mase posudice se, nakon hlađenja u eksikatoru, izmere i određuje se maseni udeo svake pojedinačne klase.

Masa "nulte probe" predstavlja 100 %, jer ona sadrži čestice svih klasa krupnoće prisutnih u suspenziji. Svi ostali odpipetirani uzorci će sadržati čestice veće od onih za koje smo izračunali vreme taloženja i posle koga smo odsisavali probu. Zato masa suve supstance u ostalim probama stalno opada. Iz mase pojedinačnih klasa krupnoće i mase nulte probe izračunava se procentualni udeo svake pojedine klase krupnoće.

Postupak analize. Menzura sa suspenzijom se dobro homogenizira, i to tako da se prstom zatvori otvor za provetravanje i cela posuda se obrće. Nakon homogenizacije pušta se u rad merač vremena. Pomoću pipete se izvlači suspenzija iz menzure i pravi serija uzoraka V_p sa nivoa H_n u toku određenog vremena nakon homogeniziranja, počevši sa vremenom t_1 koje odgovara traženoj veličini čestica. Vreme se izračunava iz poznate jednačine. Proračuni krupnoće čestica treba da su u opadanju za modul $\sqrt{2}$. Vreme koje je potrebno da bi se pipeta napunila ne može biti kraće od 20 sekundi. Suspenzija se ispušta iz pipete u izmerenu posudicu za odmeravanje. Kada se suspenzija iz kruškastog proširenja oce-

di, sa pipete se skine gumena cevčica za odsisavanje i pomoću obične pipete od 10 ml sipa se 5 do 7 ml vode u kruškasto proširenje kako bi se isprale čestice koje su eventualno zaostale na površini stakla. Ova voda se prihvata posudicom za odmeravanje. Kapilara sedimentacione pipete mora biti ispunjena suspenzijom. Sadržaj prihvatne posude se suši do konstantne mase tako da dva uzastopna merenja ne smeju biti manji od 0,1 mg. Izračunava se masa date klase krupnoće m_n uzimajući u obzir masu disperzionog sredstva koje se određuje pomoću nulte probe. Eksperimentalno se odredi smanjenje dubine i ovo smanjenje uzme u obzir pri sledećim proračunavanjima. Smanjenja dubine iznosi obično 4 mm za svako uzimanje proba.

✱ **Primer:** Određivanje granulometrijskog sastava uzorka gline, metodom pipete, čija je gustina $\rho = 2,41 \text{ g/cm}^3$ a gustina fluida za taloženje $\rho_f = 1,000 \text{ g/cm}^3$. Prvo se izračuna vreme sedimentacije datog prečnika čestica, a rezultati se prikazuju kao u tablici 5.23.

$$t = \frac{18 \cdot h \cdot H}{(r_m - r_f) \cdot 981 \cdot d^2} \text{ (sec)}$$

gde je:

H - visina padanja čestica (cm);
g - 981 cm/sec²;
d - prečnik čestica (cm).

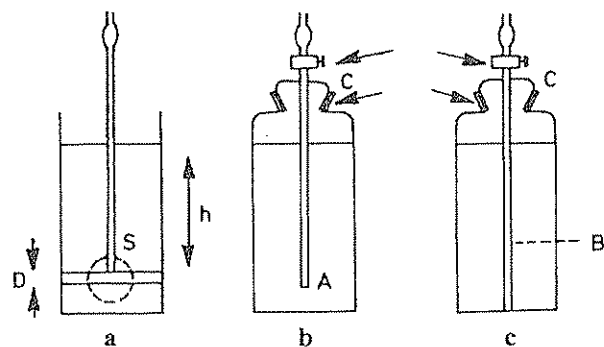
✱ ✱ ✱

Udeo pojedinih klasa krupnoće je vrlo važan faktor i od njega zavise mnoge tehnološke osobine i rezultati do kojih se može doći tokom koncentracije sirovina. U prikazanom primeru od bitnog je uticaja udeo klase krupnoće manje od 5 μm . Što se mineraloškog sastava tiče finije čestice, manje od 20 μm , se najčešće pripisuju prisustvu minerala gline, dok krupnije čestice čine slobodni silicijumdioksid, feldspati, liskuni i drugi minerali koji se sreću u glinama.

Tablica 5.23 Rezultati granulometrijske analize Andreasen-ovom pipetom

Krupnoća zrna u μm	Visina stuba	Vreme pipetiranja			Masa materijala		Granulo sastav		Klase krupnoće (μm)
		časova	minuta	sekundi	ukupna	razlika	M, %	$\Sigma M, \%$	
Nulta proba					0,0796				
50			1'	44''	0,0709	0,0087	10,93	10,93	50-60
40			2'	40''	0,0670	0,0039	4,90	15,83	40-50
30			4'	41''	0,0597	0,0073	9,17	25,00	30-40
20			10'	25''	0,0457	0,0140	17,59	42,59	20-30
10			42'	2''	0,0300	0,0157	19,80	62,39	10-20
5		2 h	41'	10''	0,0170	0,0130	16,30	78,59	5-10
2		9 h	40'	50''	0,0162	0,0008	1,00	79,59	2-5
2-0		Razlika do 100%					20,41	100,0	0-2

Danas se u laboratorijama koriste, pri granulometrijskoj analizi, različite konstrukcije pribora kod metoda pipetiranja. Osnovne konstrukcije su date na slici 5.28.



Sl. 5.28 Konstrukcije pribora kod metoda pipetiranja. Legenda: a. Osnovna konstrukcija, S zona odsisavanja suspenzije i D visina stuba suspenzije sa koje se izdvaja uzorak; b. Andreasen-ova pipeta i menzura, sa brušenim zatvaračem i ventilom; c. Pipeta Leschonski, B otvor na kapilari za pipetiranje suspenzije.

Tok izvođenja analize. Uzorak za analizu granulostava najčešće prvo prosejemo na jednom od sita sa najmanjim otvorima iz standardnih laboratorijskih serija sita (61 mm; 53 mm; 38 mm). Podrešetni proizvod se nakon sušenja meri i drži u eksikatoru do početka analize. Određuje se njegova gustina na jedan od poznatih načina. Odabere se disperziona tečnost (najčešće je to destilovana voda) i određuje se dinamički viskozitet η i gustina tečnosti ρ_f . Nakon toga se izračunavaju vremenski intervali, da bismo nakon uzimanja prvog "nultog uzorka" znali vreme izdvajanja svih narednih uzoraka. Vreme t (u sec) sedimentiranja uzorka sirovine određenog prečnika d (u mm) na dubini H (u cm) od gornjeg nivoa suspenzije može se izračunati iz obrasca:

$$t = 18 \cdot 10^7 \eta H / (\rho - \rho_f) g d^2$$

gde je: g - ubrzanje zemljine teže pri slobodnom padanju, m/sec^2 .

Kod izračunavanja vremena t , pri izdvajanju uzorka suspenzije, neophodno je voditi računa o stalnom snižavanju visine H stuba suspenzije nakon svakog prethodnog uzorkovanja. Srednja vrednost smanjenja visine H stuba suspenzije određuje se eksperimentalno. Iz tog razloga menzura mora biti strogo vertikalna, napunjena tačno do crte, koja označava 500 ml, i tačno ba-

darenom pipetom od 10 ml (vakum pumpicom) se uzima unapred određena količina uzorka.

Ukupno snižavanje nivoa suspenzije, mereno sa tačnošću $\pm 0,5$ mm, deli se na broj izdvojenih uzoraka i izračuna srednja vrednost skoka - snižavanja nivoa pri izdvajanju jednog uzorka. Pri izdvajanju prvog uzorka preporučuje se da otvor pipete ne bude na dubini manjoj od 20 cm, meren od površine nivoa suspenzije. Kako bi se vreme analize skratilo i ubrzao postupak, izdvajanja uzoraka dela suspenzije koja sadrži čestice granične krupnoće $6,3 \mu\text{m}$, pipeta se tako podesi da bude uronjena do dubine $H=10$ cm, dok pri graničnoj krupnoći čestica od $2,5 \mu\text{m}$ kapilarna cev je uronjena na dubinu $H=5$ cm.

Za analizu se iz osušenog i pripremljenog uzorka izdvoji masa od 5 g sa tačnošću od $\pm 0,0001$ g. A pri analizi fino disperznih prahova ($d_{50} < 50 \mu\text{m}$) uzima se samo 2,5 g. Odmereni uzorak se uspe u pehar sa disperzionom tečnošću i homogenizira, odnosno disperguje u trajanju od 1 min (preporučuje se ultrazvučna kadica). Nakon dispergovanja u suspenziju se dodaje tečnost do potrebnih 500 ml pokrije poklopcem i ostavi da odstoji dva sata u termostatu radi izjednačavanja temperature (temperaturu održavati na $20 \pm 0,5^\circ \text{C}$). Nakon isteka vremena suspenziju energično homogenizirati par minuta, uključiti štopericu i započeti sa analizom. Nakon izdvajanja "nultog uzorka" izdvajaju se, za unapred određena vremena, ostali uzorci u seriji. Svaki uzorak se nakon sušenja do konstantne mase, meri sa tačnošću od $\pm 0,0001$ g i određuje masa m_i . Baždareni rezervoar pipete zapremine V_1 , se nakon svakog izdvajanja uzorka suspenzije ispira, tačno određenom zapreminom V_2 disperzione tečnosti, kako bi se sprale eventualno zaostale čestice po zidovima suda.

♣ Primer. Uslovi izvođenja analize: materijal - fino samleveni kvarcni pesak; disperziona tečnost - destilovana voda; temperatura suspenzije 20°C ; zapremina suspenzije u cilindru $V=500$ ml; zapremina uzorka suspenzije $V_1=10$ ml; masa praha u cilindru $m_m=5$ g; stabilizator (kao antikoagulant) 20 ml 0,1 normalnog rastvora natrijumfosfata; gustina disperzione sredine $\rho_f=1 \text{ g/cm}^3$; gustina disperzione faze (materijala-sirovine) $\rho_s=2,65 \text{ g/cm}^3$; viskozitet disperzione sredine $\eta=0,001005 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Pri odsisavanju uzorka pipetom, nivo suspenzije u cilindru se spušta za 0,5 cm. Vreme t izdvajanja uzorka (sa graničnim prečnicima čestica $d=25; 16; 10; 6,3; 4; 2,5; 1,6$), utvrđuje se računski, uzimajući u obzir stalnu promenu trajanja sedimentacije usled spuštanja gornjeg nivoa suspenzije u menzuri.

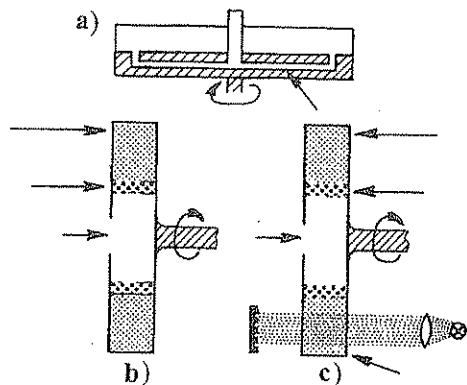
Tablica 5.24 Primer izvođenja granulometrijske analize fino samlevenog kvarca

Granični prečnik, d (u μm)	Vreme pipetiranja uzoraka t	Masa suvog ostatka m (u g)	$m-m_0$	$L \geq M, \%$ odseva	Klase krupnoće $P_{n+1} - P_n$ (u μm)	Maseni udeo $M, \%$
25	0 h, 5min, 56sec	0,0953	0,0931	93,1 ^{1*}	> 25	6,9
16	0 h, 14min, 5sec	0,0845	0,0823	82,3	16-25	10,8
10	0 h, 35min, 9sec	0,0637	0,0615	61,5	10-16	20,8
6,3	0 h, 46min, 36sec	0,0523	0,0501	50,1	6,3-10	11,4
4,0	1 h, 49min, 50sec	0,0322	0,0030	30,0	4,0-6,3	20,1
2,5	2 h, 11min, 20sec	0,0175	0,0153	15,3	2,5-4,0	14,7
1,6	5 h, 25min, 11sec	0,0082	0,0060	6,0	1,6-2,5	9,3
—	—	—	—	—	< 1,6	6,0

^{1*} $M_p = [(0,0953 - 0,0022) \cdot 500 / 10,5] \cdot 100 = 93,1 \%$

5.4.6 ANDREASEN-OVA CENTRIFUGALNA PIPETA

Već poznata Andreasen-ova pipeta za klasiranje sitnih zrna ovoga puta usavršena i funkcioniše na istim principima ali u polju centrifugalnih sila. Ovim metodom se vrši granulometrijska analiza uzoraka u suspenziji sa rasponom zrna od 0,05 do 10 μm , a uglavnom se primenjuje za zrna manja od 5 μm . Veliko ubrzanje pospešuje taloženje, što znatno skraćuje vreme merenja, a sa druge strane eliminiše greške prouzrokovane konvekcijom ili difuzijom. U različitim vremenskim intervalima (za koja su izračunate odgovarajuće krupnoće zrna po Stokes-ovom zakonu) odvajaju se uzorci istih zapremina iz rotirajućeg suda za merenje.



Sl. 5.29 Ilustracija rada centrifugalnih diskova. Legenda: a. Slater i Cohen-ova centrifuga; b. ICI sedimentometar; c. Kaye-ov centrifugalni fotosedimentometar.

Za analizu granulometrijskog sastava po ovom postupku potrebno je 1-5 g uzorka (čvrste mineralne faze). Naime, pripremi se 160 ml suspenzije u koju je dispergovano 0,5 % čvrste faze (uzorka) od koje se, u rotirajući sud za merenje uspe 150 ml, dok je ostatak od 10 ml suspenzije za određivanje početne koncentracije. Vreme trajanja snimanja je određeno krupnoćom zrna koja se tretiraju, gustinom čvrste i tečne faze, viskozitetom tečnosti i brzinom centrifugiranja. Uređaj je opremljen elektromotorom sa dve brzine za centrifugiranje, sa šest kapilara istih dužina, čime je omogućeno istovremeno odsisavanje suspenzije i homogenost uzorkovanja, uređaj ima integralno instalisanu vakuum pumpu kao i 10 mililitarsku staklenu pipetu.

Za analizu granulometrijskog sastava veoma finih (koloidnih) čestica koriste se i druge metode centrifugalne sedimentacije. Prednosti rada sa centrifugalnim diskovima, u odnosu na uređaje gde se sedimentacija odvija u kolonama, je

da se ovde čestice talože radialno, čime se eliminišu greške koje nastaju usled ometanja taloženja čestica zidovima kolone. Osnove konstrukcije uređaja - centrifugalne pipete, razradili su Slater i Cohen. Slika 5.29 a, prikazuje osnovne principe rada nekoliko tipova centrifugalnih diskova. Na istim principima danas funkcioniše i pomenuta Andreasen-ova pipeta.

Raspodela čestica po krupnoći (granulometrijski sastav) se izračunava na osnovu izmerenih podataka o koncentraciji čvrste faze, u seriji uzoraka koji su izdvojeni iz centralne drenažne (dovodne) kapilare pri različitim vremenskim intervalima. Izračunavanje je prilično složeno zbog razlike u početnom ubrzanju čestica koje počinju da se talože, ali sa različitim udaljenosti od centra rotacije.

Kod ICI centrifugalnog sedimentometra, suspenzija čiji se granulometrijski sastav ispituje, se kroz ulazni otvor ubrizgava (injektira) u čist fluid u prostor rotirajućeg diska, i formira se jedan sloj suspenzije na slobodnoj površini tečnosti. Nakon izvršenog centrifugiranja uzorci suspenzije sa česticama iste krupnoće se izdvajaju, isisavanjem kroz ulazni otvor. Nedostaci ovoga uređaja su, jedino možda, u izvesnoj nestabilnosti tečne faze, jer se relativno visoka koncentracija čestica (čvrste faze) ubrizgava u uređaj da bi se obezbedile dovoljne količine uzoraka. (Slika 5.29 b)

Centrifugalni fotosedimentometar koga je konstruisao i razradio Kaye sa saradnicima, je sličan uređaj kao i predhodni, mada su nastali skoro istovremeno ali nezavisno jedan od drugog. Novina, kod ovog uređaja je da se promena koncentracije čestica u suspenziji prati propuštanjem svetlosnog snopa kroz prozirni (centrifugalni) disk u kome se vrši razdvajanje čestica. Registracija, uz pomoć osetljive fotočelije, je slična onoj kod skenirajućeg fotosedimentometra (firme Fritsh). Uređaj se pokazao vrlo dobrim kako u pogledu rezolucije (razdvojne moći) tako i u pogledu brzine rada posebno pri promeni uzoraka kada nije potrebno zaustavljanje i čišćenje rotirajućeg diska. Čak i vrlo niske koncentracije čvrste faze (čestica) u suspenziji mogu dati zadovoljavajuće rezultate, međutim rasipanje svetlosti zbog vrlo sitnih čestica stvara poteškoće kod interpretacije zbog promene koncentracije čestica. (Sl. 5.29 c).

Alpinina sedimentacijska centrifuga 400SZF predstavlja jedan od savremenijih uređaja za rad na većim serijama uzoraka, u relativno kratkom vremenu. Raspon krupnoće čestica koje ovaj uređaj može da analizira je

od 0,2–15 μm . Mogu se analizirati svi materijali, koji se analiziraju i Andreassenovom pipetom, a da im je gustina $>1,20\text{g/cm}^3$. Upotrebljiva je čak i za materijale $<2\mu\text{m}$ (50–100 %). Uređaj radi sa uzorkom od oko 0,2 do 0,5 zapreminska procenta u suspenziji. Zapremina kivete za analizu je oko 20 cm^3 . Vreme analize zavisi od krupnoće čestica, tako za čestice od 0,2 μm treba 60 min.; za 1 μm treba 5 min; za 10 μm treba 5 sec.

5.4.7 GRANULOMETRIJSKE ANALIZE METODAMA HIDROMETRISANJA

Uređaji, koji se koriste za određivanje granulometrijskog sastava (disperznog sastava) suspenzija merenjem njene gustine (gustine stuba suspenzije), se mogu podeliti na nekoliko grupa, zavisno od principa na kom rade.

- Na osnovu merenja mase zaronjenog tela ("plovka"), čija dubina zaranjanja u toku sedimentacije ostaje ne promenjena (metoda Mor-Westfal-ove vage);
- Na osnovu merenja dubine zaranjanja potopljenog tela (areometrisanje);
- Na osnovu merenja gustine u horizontalnom stubu suspenzije.

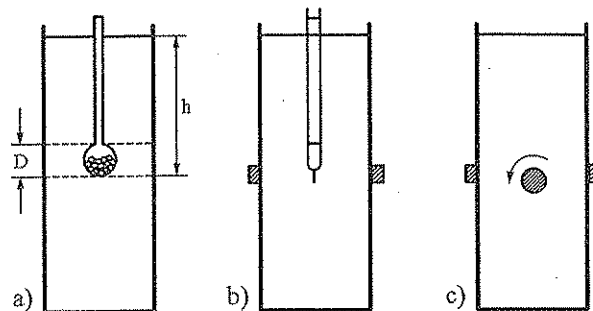
Pored ovih uređaja, za određivanje disperznog sastava suspenzija - granulometrijskog sastava - postoje i oni koji se zasnivaju na merenju hidrostatskog pritiska suspenzije. Ovi sedimentometri koriste princip spojenih sudova ili Vignerovu cev. Jedan od prvih uređaja ove vrste pominje se, u svojoj osnovnoj ideji, još 1918. godine (Viegner-ova cev). Vignerovom cevi se određuje razlika u nivoima čistog rastvarača u jednoj užoj cevi, i stuba suspenzije koja sedimentira u široj cevi. Razlika u nivoima posledica je promene gustine stuba suspenzije usled taloženja čestica. Razlika u gustinama najveća je na početku sedimentacije, a zatim postepeno opada kako se sedimentacija odigrava, odnosno zavisno od krupnoće i raspodele čestica. Sa izvesnim doradama i tehničkim poboljšanjima, kasnije nalazimo uređaje koji rade na ovom principu kod Kelli-ja i Cunker-a.

5.4.8 METODE HIDROMETRISANJA

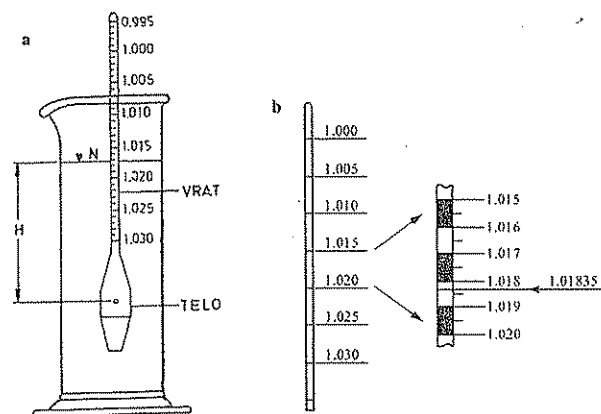
Osnovni principi metoda hidrometrisanja - areometrisanja mogu se ilustrovati kao što je dato na slici 5.30. Zasnovane su na osnovnim principima da u momentu t areometar koji se potopi u suspenziju, tone do određene dubine H. Iz teorije areometrisanja sledi da je gustina zabeležena na vratu areometra srednja vrednost gustine suspenzije iznad horizontalnog preseka D (iznad linije težišta areometra). Da bi se donekle prevazišli problemi vezani za očitavanja tokom areometrisanja, "uzmućivanja" suspenzije i disperzije praškaste čvrste materije, razvijeni su pribori koji koriste čitav niz "kapsula", odnosno malih areometara sa tačno određenom gustinom, koji se mogu potpuno zaranjati u suspenziju, a zatim detektovati dubina zaranjanja magnetski. Slabosti Bergovog originalnog tehničkog rešenja je što su kapsule bile privlačene na stranu, ka zidovima suda, remeteći na taj način slobodno, mirno taloženje čestica suspenzije i nemogućnosti da se tačno locira pozicija kapsule.

U tehnici koju su razvili Jarrett i Heywood (Sl. 5.30 b), serija kapsula je skupljena i postavljena u šupljinu centralne kolone smeštene u menzuri sa suspenzijom.

Moment kad kapsula krene sa dna kolone i prođe pored ćelije za detekciju je vreme kad gustina suspenzije upravo padne ispod one koju ima kapsula. Mane ovog sistema se javljaju u konvekcijom strujanjima ispod same kolone, kao kod metode pipetiranja. Takođe je, često, neophodno protresti centralnu kolonu da bi se zaglavljene kapsule oslobodile.



Sl. 5.30 Konstrukcije pribora kod metode hidrometrisanja. Legenda: a. Klasični areometar; b. Uređaj Berg-a razrađen od Jarrett i Heywood-a sa centriranom kapsulom i magnetnim senzorima na menzuri; c. Uređaj sa "rotirajućom kapsulom".



Sl. 5.31 Tipovi areometra i način očitavanja gustine suspenzije pri određivanju granulometrijskog sastava sirovine u suspenziji.

Kod tehnike "rotirajuće kapsule" (Sl. 5.30 c), sferična kapsula je načinjena od dve međusobno spojene šuplje duraluminijumske polulopte. Kapsula je centrirana i simetrična tako da može slobodno rotirati, stresajući pri tom sve čestice koje sedimentiraju na nju.

5.4.9 AREOMETRIJSKA METODA PO CASAGRANDE-U

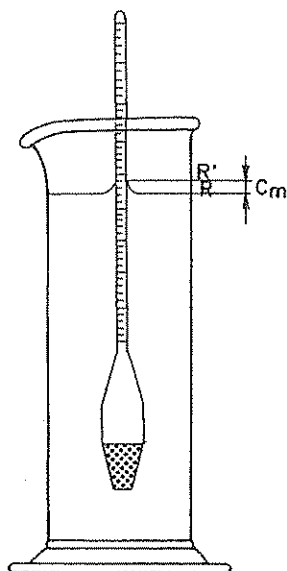
Određivanje granulometrijskog sastava zrna malih dimenzija može se vršiti i pomoću areometra ili hidrometra ili denzimeta. Ova metoda se, kao i predhodne, zasniva na Stokes-ovom zakonu i izučavanjima Oden-a, da mineralna zrna različite veličine, a iste zapreminske mase, imaju različitu brzinu tonjenja u vodi (konačnu brzinu padanja). Ukoliko su zrna veća utoliko je njihovo tonjenje brže, pri istoj zapreminskoj masi. Areometar se sastoji od tela areometra, proširenog dela sa živom ili olovnom kuglicama na dnu i uskog vrata na kome je nanaeta skala za čitanje dubine tonjenja areometra u suspenziji. Na slici 5.31 prikazana su dva tipa areometra: a. Bouyencos-ov i b. Arthur Casagrande-ov. Dubina tonje-

nja u suspenziji H se računa od težišta areometra do nivoa tečnosti N u menzuri. Na početku sedimentacije, neposredno posle intenzivnog homogeniziranja suspenzije u menzuri od 1000 cm^3 suspenzija ima ravnomernu gustinu jer su čvrste čestice ravnomerno raspoređene u celoj masi. Sa vremenom taloženja gustina sve više opada, jer se najpre talože veće, a potom sve manje čestice i koncentracija suspenzije opada. Dubina tonjenja, težišta areometra H u suspenziji se menja sa gustinom. Ona je za destilovanu vodu najveća i iznosi $H_0 = 1$, u slučaju da se voda nalazi na temperaturi za koju je izbaždaren areometar. Najmanja dubina H_m odgovara najvećoj gustini suspenzije, tj. trenutku početka sedimentacije.

5.4.10 KOREKCIJE

Navedeni obrasci moraju se dopunjavati korekcijama, među kojima su najvažnije sledeće:

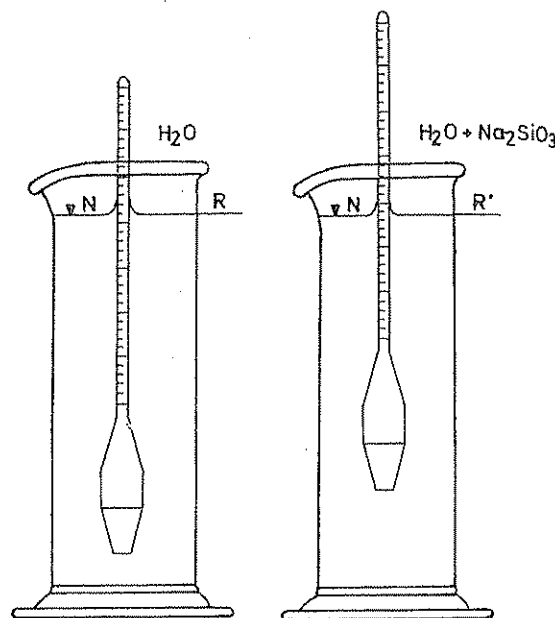
Korekcija meniska. Pošto čitanje na areometru treba da se vrši na donjoj površini meniska, a suspenzija nije prozirna, to se areometar čita kod gornje ivice meniska, s tim što se čitanju R' dodaje korekcija za visinu meniska c_m oko vrata areometra. Ova razlika je konstantna za svaki areometar i određuje se samo jedanput. Određivanje korekcije c_m vrši se na taj način, što se areometar spusti u menzuru sa destilovanom vodom i izvrši čitanje na skali, jedno na gornjoj ivici meniska, drugo na horizontalnoj površini vode. Razlika između ova dva čitanja daje korekciju meniska c_m . Pošto podela na skali areometra raste odozgo naniže, to je gornje čitanje R' manje od donjeg R . Zbog toga se korekcija $c_m = R - R'$ dodaje gornjem čitanju R' .



Sl. 5.32 Određivanje korekcije meniska

Korekcija zbog upotrebe sredstava za sprečavanje koagulacije. Radi sprečavanja koagulacije čvrstih čestica, tečnosti se dodaje neki antikoagulant (najčešće Na_2SiO_3 koncentracije 40° Bomea, u količini od 1 cm^3 na 1000 cm^3 tečne faze). Antikoagulant se predhodno razblaži u destilovanoj vodi. U slučaju dodavanja veće količine antikoagulansa najsitnije čestice dugo lebde u vodi i pogrešno se dobija veća količina najsitnijih klasa krupnoće. S druge strane ako antikoagulansa ima nedovoljno, doći će do obrazovanja grudvica, koje brzo tonu

te će se dobiti više krupnijih čestica. Dodavanjem ovog sredstva povećava se gustina suspenzije, zbog čega je potrebno izvršiti korekciju c_a , koje se određuje na sledeći način. Areometar se potopi u menzuru sa destilovanom vodom i očita vrednost R . Posle se izvadi areometar iz vode i doda određena količina antikoagulansa, te se ponovo očita podela areometra R' . Razlika između ova dva čitanja daje korekciju $c_a = R' - R$. Ova razlika se oduzima od čitanja areometra u suspenziji.



Sl. 5.33 Korekcije zbog upotrebe antikoagulanta

Korekcija usled promene temperature. Svaki areometar je baždaren na određenoj temperaturi t koja je označena na vratu areometra. Ova temperatura kontroliše se spuštanjem areometra u destilovanu vodu temperature t i čitanje treba da bude $R = 1,00$. Ako temperatura tečnosti odgovara temperaturi baždarenja areometra čitanje R daje tačnu gustinu tečnosti tj.

$$R = \frac{\gamma_m^t}{\gamma_w^t}$$

gde je:

γ_m^t - gustina tečnosti na temperaturi baždarenja t ;

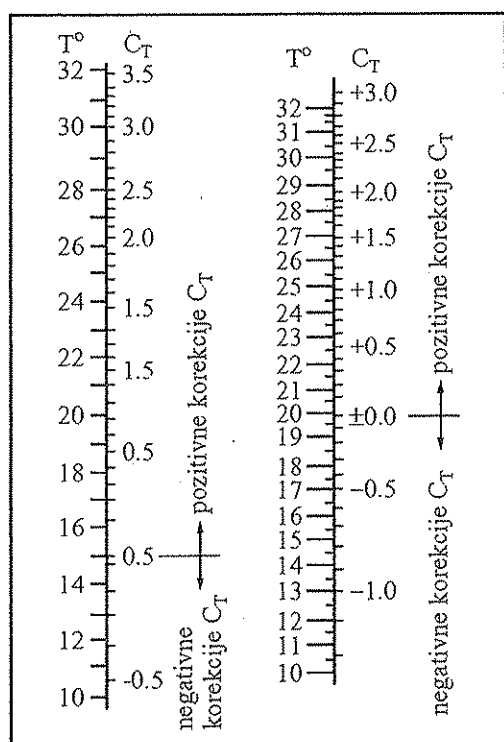
γ_w^t - gustina destilovane vode na temperaturi baždarenja.

Ako radna temperatura T tečnosti ne odgovara temperaturi baždarenja t , čitanje areometra daje odnos

$$\frac{\gamma_m^T}{\gamma_w^t}$$

gde je γ zapreminska masa (gustina) tečnosti na temperaturi T . Međutim, stvarno čitanje je drugo, jer je telo areometra dilatiralo na drugoj temperaturi, što je imalo za posledicu promenu zapremine pri potapanju u vodi. Da bi se dobila tačna gustina tečnosti na temperaturi T , treba dodati čitanju R_1 korekciju temperature c_T tako da će biti:

$$\frac{\gamma_m^T}{\gamma_w^t} = R_1 - c_T$$



Sl. 5.34 Određivanje korekcije zbog razlike u temperaturi

Korekcija c_T može da se odredi eksperimentalno. Areometar se spusti u menzuru zajedno sa termometrom. Menzura sa destilovanom vodom se polako zagreva vodeći računa da se temperatura vode u menzuri ravnomerno zagreva. U toku zagrevanja čitaju se temperature na areometru i termometru. Za ma koju temperaturu destilovane vode T dobiće se na osnovu predhodnog obrasca c_T .

$$C_T = (\gamma_w^T / \gamma_w^t) - R,$$

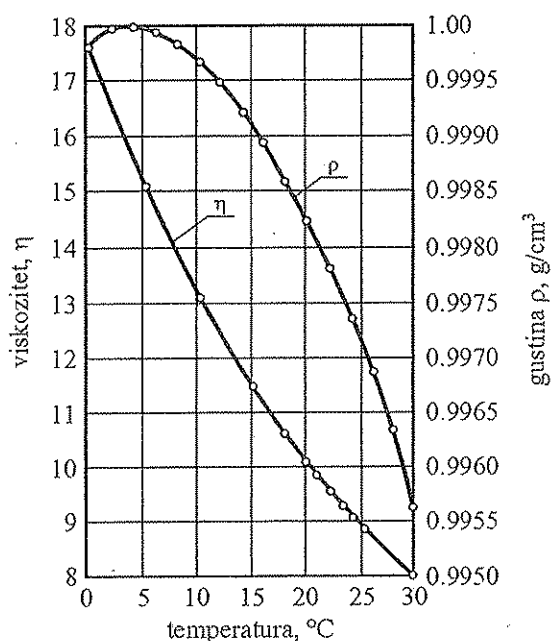
gde je R , korigovano čitanje na areometru na temperaturi T . γ_w^T i γ_w^t su gustine destilovane vode na temperaturi čitanja areometra T i baždarenja t . U odnosu na baždarenu temperaturu areometra (na primer $t = 20^\circ \text{C}$) može se pomoću navedenog obrasca odrediti korekcija c_T za radne temperature destilovane vode (obično $T = 14 - 30^\circ \text{C}$) i na taj način izraditi dijagram korekcije iz koga se može dobiti korekcija za ma koju temperaturu tečnosti.

Korekcija usled izdizanja nivoa suspenzije u menzuri. Potapanje areometra u menzuru sa suspenzijom izaziva podizanje nivoa tečnosti u njoj, zavisno od zapremine tela areometra (zapremina vrata areometra se zanemaruje). Lebdeće čestice u suspenziji na dubini H , težišta areometra, koja se dobija čitanjem podele R , bile su bliže površini za vreme taloženja pre potapanja areometra u suspenziju nego posle potapanja. Visina izdizanja nivoa suspenzije zbog potapanja areometra (d), se može izračunati iz odnosa zapremine areometra (V) i površine unutrašnjeg preseka menzure (A):

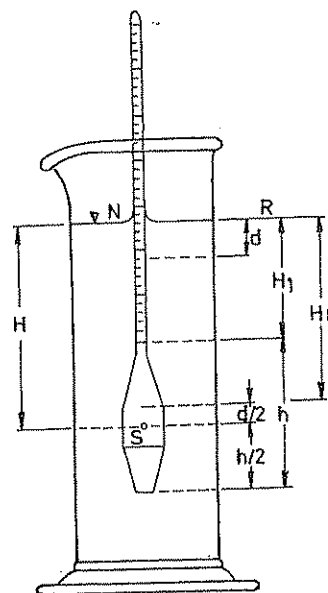
$$V = A \delta$$

odakle je $\delta = V/A$ (u cm). Ako je težište tela areometra S u sredini tela onda se može izračunati dubina tonjenja areometra u suspenziju H_r računato od izdignutog nivoa N u menzuri do težišta S po sledećem obrascu:

$$H_r = H_1 + 1/2 (h - (V/A))$$



gde su: H_1 - rastojanje od nivoa suspenzije do gornjeg kraja kruške areometra; h - visina tela areometra. Ovako reducirana dubina H_r tonjenja areometra figuriše u krajnjem obrascu za izračunavanje prečnika zrna. Visina d određuje se samo jedanput za dati areometar i menzuru.

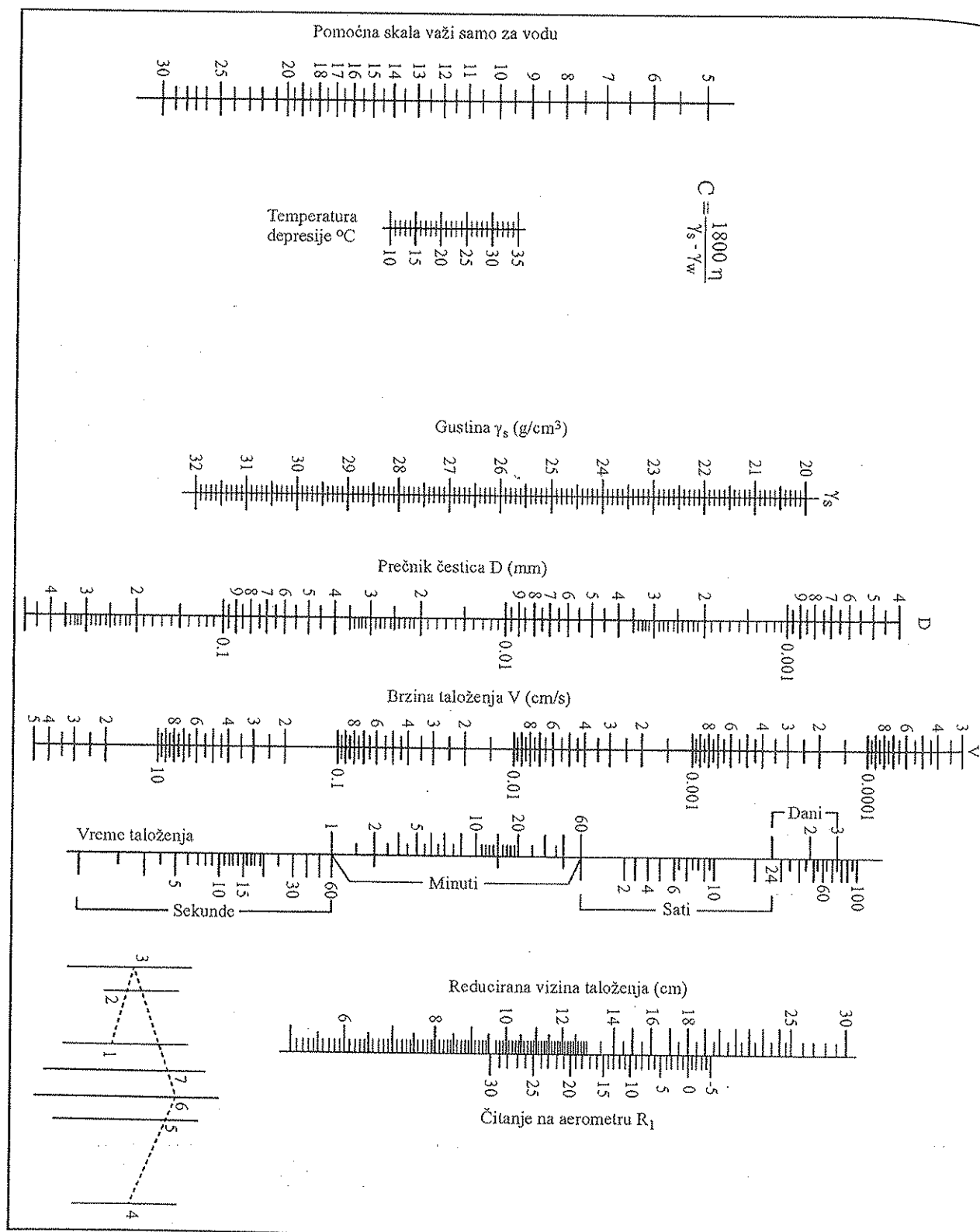


Sl. 5.35 Određivanje korekcije zbog izdizanja suspenzije u menzuri

Tok izvođenja. Za vršenje opita areometrisanja uzima se 30 - 50 g osušenog reprezentativnog uzorka, prosejanog kroz sito od 0,1 mm (ili prosev sita 0,074 mm). Materijal se izmeri na vagi sa tačnošću od 0,01 g i zatim sipa u sud sa oko 200 cm³ destilovane vode, dobro homogenizira i ostavi da miruje najviše do 24 časa, kako bi se eventualne spojene čestice međusobno razdvojile. Kod nekih mineralnih sirovina izmerena količina suvog

materijala pomešana sa vodom se homogenizira oko dva časa mešalicom (ili pak kuva najmanje dva časa). Dodaje se sredstvo za sprečavanje koagulacije, koje se pre sipanja u menzuru razblaži destilovanom vodom. Suspenzija se prebaci u menzuru od 1000 cm³ i dodaje destilovana voda do crte koja označava 1000 cm³. Potom se menzura dobro homogenizira držeći dlanom ruke otvor menzure. U trenutku postavljanja menzure na

podlogu uključuje se štoperica. Tog časa počinje sedimentacija i gustina suspenzije postaje usled taloženja sve manja. U menzuru se spušta aerometar pri čemu se pazi da se on zaroni na pravilnu dubinu kako bi se izbeglo njegovo klaćenje u suspenziji. Zatim počinje očitavanje podela na aerometru. Promena gustine suspenzije se prati očitavanjem posle 30", 1',



Sl. 5.36 Nomogram za očitavanje karakteristika krupnoće po metodu Casagrande

2', 5', 15', 45', 2 h, 5 h, a zatim jedan put ili dva puta dnevno. Broj čitanja i vremenski interval između njih zavisi od tačnosti koju želimo da postignemo. (Posle 24h ne vrše se dalja čitanja, jer se čestice koje još lebde u suspenziji nalaze pod dejstvom *Brown*-ovog kretanja i manje su od 0,0002 mm). Navedeni vremenski razmaci očitavanja izabrani su tako što se u tim razmacima dobijaju krupnoće koje se na liniji granulometrijskog sastava nalaze na približno jednakim rastojanjima. Kod svakog čitanja posle 15' od početka sedimentacije meri se temperatura suspenzije. Na osnovu ovih čitanja određuje se vrednost za prečnik d i količinu čestica u procentima bilo računski ili grafički. Preporuka je da ovo rade dve osobe od kojih jedna prati vreme dok druga očitava po dele na vratu areometra vodeći računa pri tome da se on neprestano rotira u suspenziji. Pri zaranjanju areometra pazimo da što je više moguće smanjimo njegovo njihanje u suspenziji kako bi izbegli greške pri očitavanju. Posle 2' areometar se vadi i stavlja u drugu menzuru sa destilovanom vodom, opere i osuši suvom krpom i tako pripremi za naredno merenje. Čitanje na areometru se vrši tako što se najpre odozdo posmatra slobodna površina suspenzije u obliku kruga. Zatim pogled polako podižemo dok slobodnu površinu ne vidimo u obliku prave linije u tom trenutku očitavamo gustinu i to na gornjoj ivici meniska, jer su suspenzije najčešće neprovidne. Očitane vrednosti R korigujemo svim gore navedenim korekcijama i tek sa tako dobijenom vrednošću ulazimo u nomogram, dat na slici 5.36., na kojoj je skicirano i samo rešavanje, odnosno način izračunavanja preč-

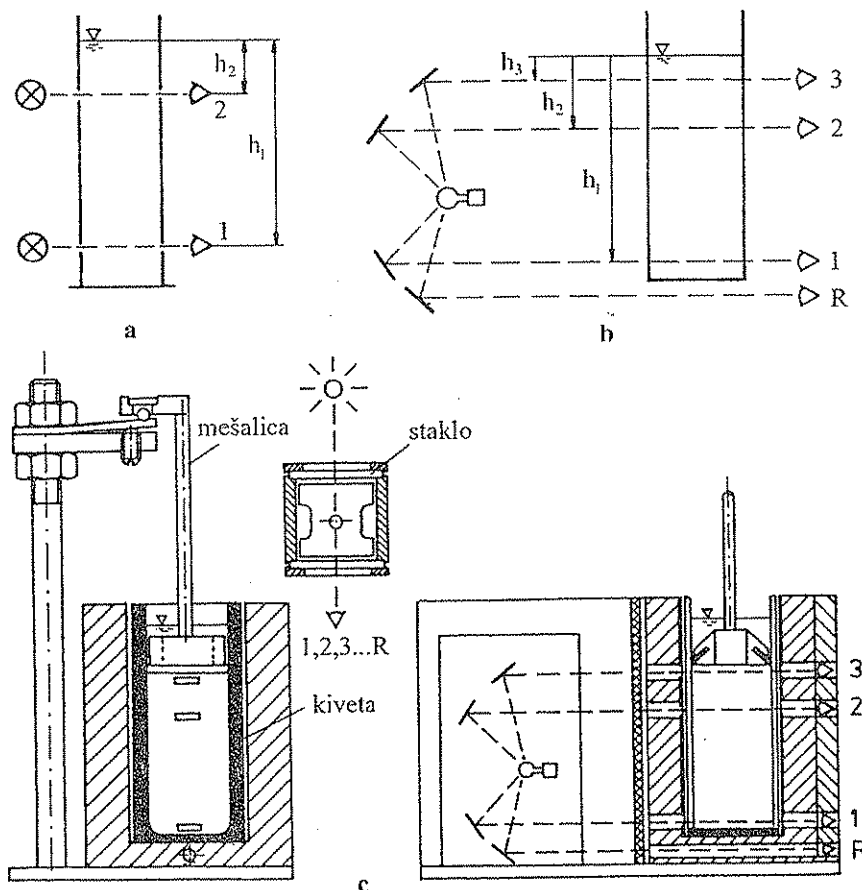
nika zrna u milimetrima. Udeo pojedinih klasa krupnoće izračunava se po ranije datoj jednačini.

5.4.11 FOTOSEDIMENTACIJSKE METODE

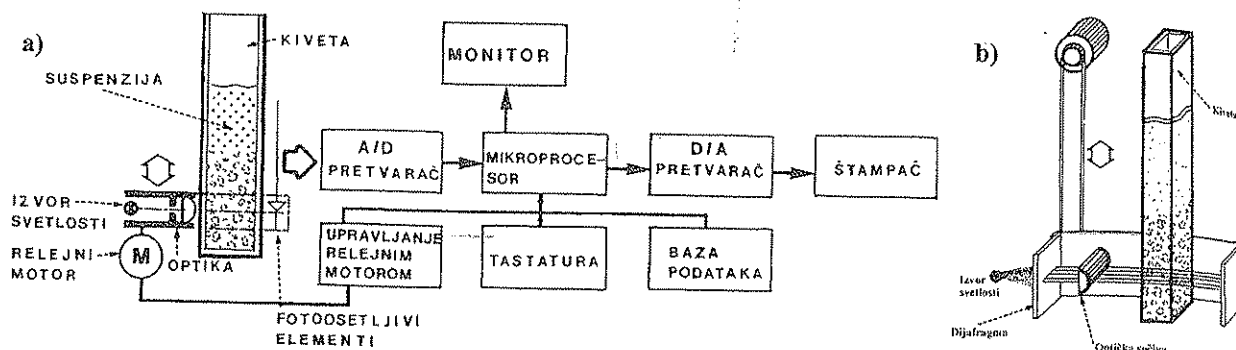
Fotosedimentometar LUMOSSED (firme Retsch, konstrukcije prof.dr Staudinger-a sa Institute of Chemical Engineering of the University of Graz, Austria), radi na principu fotometrijske sedimentacije sa visokom tačnošću, reproduktivnošću i kratkim vremenom analize. Za analizu je potrebno 0,1 do 0,5 g uzorka. Uređaj je pogodan ne samo za određivanje granulometrijskog sastava uzoraka i određivanje krupnoće zrna već i za ispitivanje pojava aglomeracije čestica u suspenziji, kao i za ispitivanje stabilnosti emulzija. Tri koherentna svetlosna snopa, postavljena paralelno i usmerena na kivetu sa suspenzijom, detektuju padajuće čestice. Promena zatamnjenja uslovljena je promenom koncentracije čvrste faze u suspenziji.

Skenirajući fotosedimentograf ANALYSETTE 22. Uređaj (firme Fritsch ANALYSETTE 22) služi za automatsko merenje krupnoće zrna - određivanje granulometrijskog sastava, u rasponu od 0,5 do 500 μm . Kao i kod svih ostalih metoda sedimentacije potrebno je:

- poznavati gustinu čvrste faze - uzorka sirovine;
- poznavati gustinu i viskozitet sedimentacione tečnosti u kojoj će biti dispergovana čvrsta faza;
- uzorak ne sme biti rastvorljiv, niti sme da flokulira;
- uzorak mora biti reprezentativan.



Sl. 5.37 Šema rada skenirajućeg foto sedimentometra tipa LUMOSSED. Legenda: a-opšti princip rada fotosedimentometra; b- princip rada sa multipliciranim senzorima; c-konstrukcija i rad uređaja LUMOSSED.



Sl. 5.38 Princip rada skenirajućeg fotosedimentografa (Fritsch)

Pod određenim uslovima moguće je vršiti klasiranje i ispod $0,5 \mu\text{m}$ krupnoće zrna. Brzina sedimentacije neće isključivo zavisiti od krupnoće zrna već i od razlike u gustini čvrste i tečne faze u suspenziji. Uređaj je opremljen sudom od 200 ml za sedimentaciju - kivetom, koja je termički dobro izolovana i kroz koju se propušta, na nju padajući svetlosni snop. Čestice u suspenziji, tokom sedimentacije, absorbiraju jedan deo upadnog svetlosnog snopa. Intenzitet zračenja svetlosnog snopa se meri osetljivim fotoelementom - fotočelijom, smeštenom sa druge strane kivete. Zahvaljujući osetljivoj elektronici, ugrađenoj u instrument, moguće je vršiti snimanja i pri vrlo maloj koncentraciji suspenzije, od čak $0,1 \%$ vol. čvrste faze. Snop bele svetlosti pada upravno na ravan staklenog zida, optički čiste, kivete u kojoj se vrši sedimentacija, prolazi kroz suspenziju i pada na fotoelektričnu čeliju. Odatle se rezultantni signal pojačava i upućuje na pisač. Instrument se kalibrira propuštanjem svetlosnog snopa, kroz kivetu sa čistom tečnošću, na fotoelektričnu čeliju. Kada je svetlosni snop prekinut prolaskom čestice čvrste materije suspergovanog uzorka optička gustina kontinuiranog snopa će biti narušena i kao određeni signal registrovan. Merenje optičke zatamnjenosti može biti izvedeno kada se postigne

dobra disperzija suspenzije u kiveti, koristeći ugrađenu mešalicu.

Najbolji rezultati merenja postižu se za čestice od $2 - 100 \mu\text{m}$. Za čestice ispod $2 \mu\text{m}$ preporučuje se Andreasen-ova centrifugalna pipeta. Sud za sedimentaciju - kiveta, fotoelektrična čelija i delovi optike smešteni su u termički stabilan prostor instrumenta, da bi se sprečila temperaturna promena. Izvor svetlosti sa mogućnošću centriranja je izvan tog prostora. Uz pomoć optičkih vlakana svetlost se propušta do prostora sa kivetom. Pošto se za merenje koristi tzv., "hladna svetlost" neće doći do konvekcije (mešanja) suspenzije u kiveti zbog zagrevanja, što bi moglo uticati na neometanu sedimentaciju. Provodnici svetlosti, optička staklena vlakna, sa kivetom i fotoelektričnom čelijom čine jednu kompaktnu celinu tako da bilo kakva pomeranja delova za merenje neće imati uticaja na intenzitet svetlosti. Proces snimanja započinje u momentu kada se prestalo sa homogeniziranjem suspenzije. Skeniranje počinje za unapred određeno vreme, a završava kada sistem za merenje dostigne krajnju gornju tačku (najčešće 5 mm ispod same gornje površine suspenzije u kiveti). Relejni motori zatim vraćaju sistem za skeniranje na početni položaj, spreman za sledeće snimanje.

5.5 METODE ELUTRIJACIJE

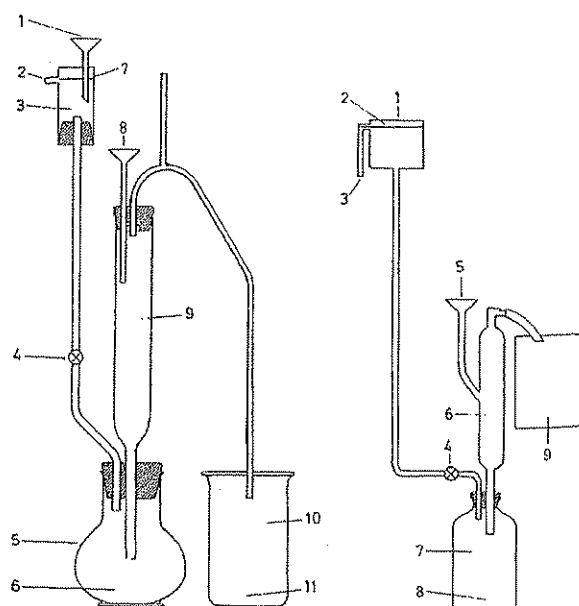
Elutrijaćijska analiza u vodenoj struji. Klasiranje sitnih zrna izvodi se u različitim uređajima u vodenoj struji, na principu hidraulične klasifikacije. Jedan takav aparat, jednostavne konstrukcije prikazan je na Sl.5.39. Protok vode kroz klasifikator reguliše se preko slavine. Količina potrebne vode, da bi se izdvojila zrna prečnika manjeg od d (u mm), određuje se po obrascu:

$$Q = v \cdot S = k \cdot d^2 (\rho_m - 1) \cdot S$$

gde je:

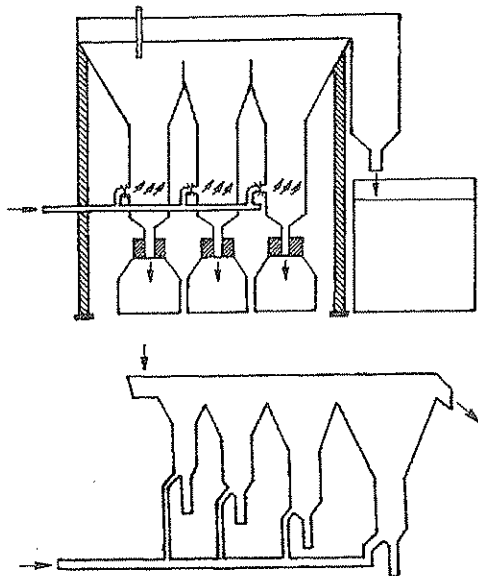
- v - brzina slobodnog padanja mineralnih zrna prečnika d ili brzina protoka vode, cm/min ;
- S - površina preseka cevi, cm^2 ;
- k - koeficijent jednak 3270 za klasiranje sferičnih zrna i 2093 za zrna nepravilnog oblika;
- ρ_m - gustina minerala, g/cm^3 .

Pošto je regulisan protok vode kroz klasifikator, dodaje se ravnomerno i postepeno uzorak kroz levak. Sitnija i lakša zrna, čija je brzina slobodnog padanja manja od brzine protoka vode biće preneti u odgovarajući sud (sud za sitne klase), a ostala zrna koja savladaju protok vode taložeće se u sudu za krupnije klase. U da-



Sl. 5.39 Hidraulički klasifikator

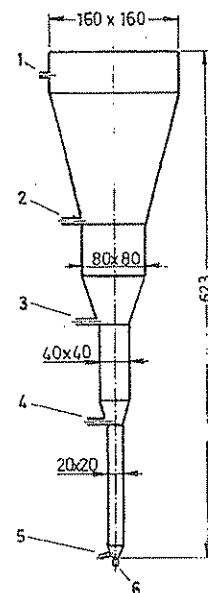
ljem toku rada klasiraju se sitna ili krupna zrna. U prvom slučaju, smanjuje se brzina protoka vode za svaki stadijum klasiranja i dobijaju odgovarajuće sitnije klase. Takva šema predstavlja klasiranje od krupnijih ka sitnijim klasama. Obrnuto, klasiranje od sitnijih ka krupnijim klasama, zahteva povećanje brzine protoka vode za svaki stadijum klasiranja. Brzina protoka vode može da se izračuna prema datom mineralu date krupnoće, u svakoj klasi zrna minerala sa većom gustoćom biće manjih prečnika od zrna datog minerala, a zrna lakših minerala će imati veće prečnike od njega.



Sl. 5.40 Hidraulički klasifikator kontinualnog dejstva

Pored ovakvih jednostavnih, a efikasnih uređaja, a koje možemo lako sastaviti čak i na terenu ili udaljenom mestu od laboratorije, industrijskom postrojenju, postoje i uređaji – hidraulički klasifikatori neprekidnog rada. Pogodni su za uzorke većih masa, ili većih serija. Dva različita tipa sličnog načina rada prikazana su na slici 5.40.

U laboratorijama bivšeg SSSR koristili su se i drugi, specifični i vrlo jednostavni ali efikasni uređaji. Jedan od njih je i uređaj, koji se koristi u laboratorijskom radu za određivanje granulometrijskog sastava, poznat pod imenom "aparatus za disperzionu analizu prahova" (ADAP).

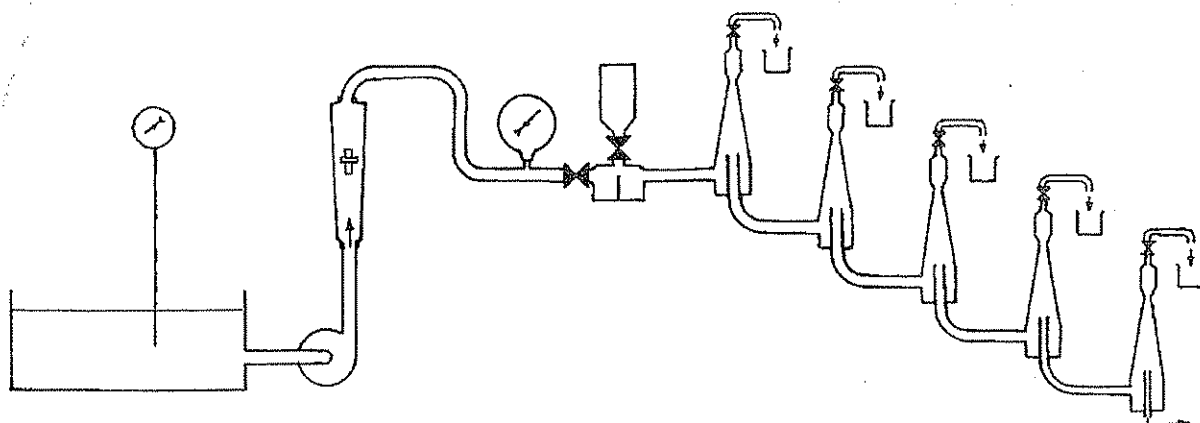


Sl. 5.41 Hidraulički klasifikator ADAP

5.5.1 WARMAN-OV CIKLOSAJZER

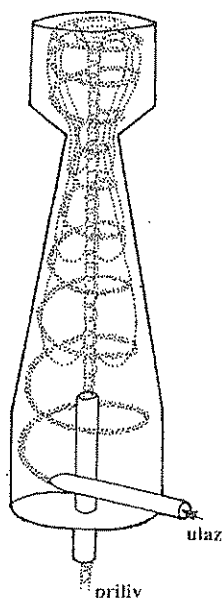
Jedan od široko primenjivanih postupaka elutriacije, određivanja granulometrijskog sastava mineralnih sirovina, u laboratorijama za PMS, jeste i Warman-ov ciklosajzer. Ova metoda određivanja krupnoće čestica malih prečnika, najčešće se koristi za rutinska testiranja i kontrolu u industrijskim procesima, za raspone krupnoća mineralne sirovine od 8-50 μm i gustina oko 2,7 g/cm^3 ili do krupnoće od 4 μm za materijale viših gustina (kao što je na primer galenit). Warman-ov ciklosajzer je uređaj koji se sastoji od pet jednakih ciklona poređanih u seriju tako da preliv prvoga predstavlja ulaz u sledeći drugi ciklon i tako dalje.

Sama ciklonska jedinica je, po svojoj funkciji, inverzna onoj konvencionalnoj. Rad ovog klasifikatora je sledeći: pumpom se, u sistem, ubacuje voda u koju se kasnije dodaje određena količina uzorka u obliku pulpe i pri određenom pritisku stvaraju konstantni uslovi rada ciklosajzera. Tangencijalno ubrizgavana suspenzija u prvi cilindar ciklona i njeno centrifugalno kretanje, dovodi do razdvajanja čestica prema njihovoj brzini kreta-



Sl. 5.42 Warman-ov ciklosajzer. Legenda: 1. Rezervoar sa vodom; 2. Termometar; 3. Pumpa; 4. Regulator pritiska; 5. Indikator pritiska; 6. Kontrola protoka; 7. Kontejner za uzorak; 8. Cikloni; 9. Posude za klasirani materijal.

nja, odnosno krupnoći. Tako imamo da se brže čestice kreću prema otvoru za pražnjenje peska (apexu), dok se istovremeno sporije čestice kreću prema otvoru za izlaz preliva (vortex), koji istovremeno predstavlja ulaz za sledeći ciklon u seriji. Postoji sukcesivno smanjenje levkastog prostora i prečnika vrtložne cevi, odnosno izlaza preliva, svakog sledećeg ciklona u smeru toka pulpe čime se postiže porast brzine protoka i porast centrifugalne sile unutar ciklona što ima za posledicu uspešno razdvajanje čestica po unapred određenim krupnoćama. Šematski prikaz kretanja i razdvajanja čestica po krupnoći u jednom od cilindara ciklona prikazan je na narednoj slici 5.43.



Sl. 5.43 Šematski prikaz kretanja i razdvajanja čestica u jednom od ciklona Warman-ovog ciklosajzera

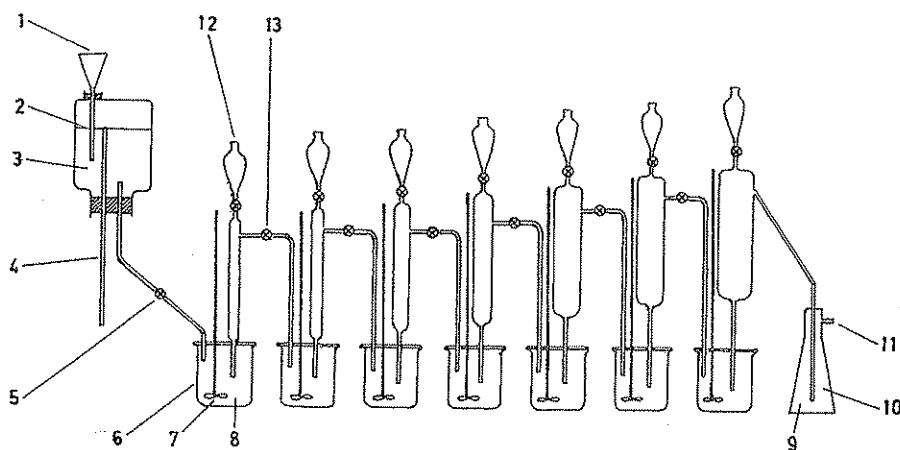
Sam uređaj ciklosajzera je tako konstruisan da ima unapred definisane krupnoće izdvajanja pri standardnim uslovima rada, kao što su: količina ulazne vode, odnosno suspenzije, temperatura vode, gustina čvrste faze (mineralne sirovine) i vreme elutriacije (zadržavanja u ciklonu). U praktičnom radu svaka promena osnovnih

parametara praćena je i novim korekcionim dijagramima. Kompletna elutriacija traje oko dvadeset minuta, nakon čega se izdvojene klase krupnoće ispuštaju iz cilindara ciklona u posebne sudove, filtriraju, suše i mere.

5.5.2 BLAJOV ELUTRIJATOR

Aparat je laboratorijski uređaj i služi za klasiranje sitnih zrna u vodi ili teškoj tečnosti u zavisnosti od konačne brzine padanja zrna. Šematski prikaz BLYTH-ovog elutriatora dat je na Sl.5.44. Elutriator se sastoji iz šest cilindričnih sudova ($a_1 - a_6$), čiji su prečnici od prvog do šestog u porastu $\sqrt{2}$. Sudovi su uronjeni u pehare, za premine oko jedan litar. Svaki sud ima pri vrhu odvodnu cev ($b_1 - b_6$) koja ulazi u susedni pehar, a odvodna cev poslednjeg suda vezana je za sud C. U svakom peharu nalazi se mešalica, čija se brzina okretanja može regulisati. Sudovi i mešalice pričvršćeni su za postolje.

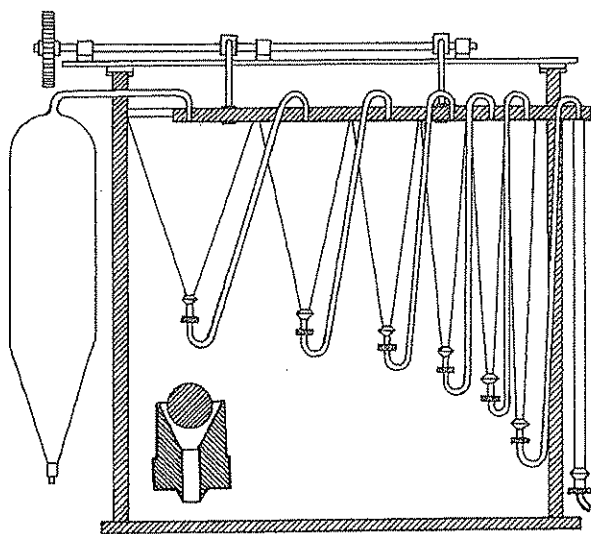
Princip rada. Voda se pumpom iz rezervoara A prebacuje u jedan sud u kome se održava konstantan nivo, tako što se višak vode vraća u rezervoar. Voda se uvodi u elutriator, a količina protoka se reguliše ventilom. Voda se prvo naspe u pehare do jedne visine, potom se otvori ventil i daljim puštanjem vode u prvi pehar uspostavlja strujanje kroz ceo sistem, a zatim se ventilom reguliše količina protoka vode kroz elutriator. Kada je elutriator spreman za analizu, uključuju se mešalice i uzorak, koji je predhodno natopljen vodom u čaši i dodat disperzant, postepeno se sipa u prvi pehar. Mešalica prihvata zrna i održava ih u suspenziji, a ona zrna koja savladaju brzinu strujanja vode sedimentiraju dok se lakša zrna transportuju vodenom strujom preko suda u pehar dva; uzorak prihvata mešalica u tom sudu i teža zrna sedimentiraju, a lakša prelaze u pehar tri i tako redom sve do suda C, gde se sedimentiraju najlakša (najsitnija) zrna. Pri konstantnoj količini proticanja vode kroz elutriator, brzina proticanja vode kroz sudove čiji su prečnici u porastu $\sqrt{2}$, biće u odnosu 32:16:8:4:2:1 a prečnici zrna u klasama $d_1:d_2:d_3:d_4:d_5:d_6$ u odnosu $1:\sqrt{2}:2:2\sqrt{2}:4:4\sqrt{2}$. Za uzorak mase oko 25 g potrebno je da elutriator radi približno 45 časova. Rezultati klasiranja su vrlo visoke tačnosti.



Sl. 5.44 Šematski prikaz Blyth-ovog elutriatora. **Legenda:** 1.Hranilica (nakvašeni uzorak – suspenzija); 2.Nivo vode u rezervoaru; 3. Rezervoar sa vodom; 4.Regulator nivoa tečnosti; 5. Ventil; 6.Prvi sud za homogenizaciju i razdvajanje materijala po krupnoći; 7.Impeler mešalice; 8.Suspenzija; 9.Sud za prihvatanje najsitnije klase; 10.Suspenzija sa najsitnijim česticama; 11.Preliv; 12.Sudovi za prikupljanje izdvojenih klasa krupnoće; 13. Ventil.

5.5.3 HOLTENOV ELUTRIJATOR

Holtenov vazdušni elutriator je uređaj koji se koristi za klasiranje sirovina koje u vodi menjaju svoja obeležja (gline, fosfati, kaolin, limonitske rude, pepeli termoelektrana i td.). Na slici 5.45 dat je šematski prikaz uređaja. Aparat se sastoji iz niza konusnih cevi od nerđajućeg čelika. Prečnici konusa i dužine su u opadanju po određenom odnosu (prečnici su od prvog do poslednjeg konusa u opadanju za modul $\sqrt{2}$). Konusi su međusobno vezani gumenim crevom, tako da je otvor prvog konusa sa najmanjim prečnikom, vezan za dovod vazduha, a poslednji konus za vreću u kojoj se skupljaju najsitnija zrna (vreća za prašinu). Vazduh se uvodi u prvi konus (sa najmanjim otvorom) i pomoću manometra reguliše pritisak, brzina strujanja vazduha od prvog do poslednjeg konusa sukcesivno opada. Na dnu svakog konusa nalazi se po jedna loptica napravljena od lake legure aluminijuma. Kada je aparat u radu ona proizvodi fine vibracije, kao i aparat u celini. Uzorak mase 50 - 1000 g ubacuje se u prvi konus preko vibro-hranilice. Zrna nošena strujom vazduha udaraju o lopticu (koja leži na gumenom prstenu) i prolaze u tankom mlazu velikom brzinom između lopte i gumenog ležišta u prostor konusne cevi za elutriaciju. Zrna koja savladaju strujanje vazduha u konusima, padaće na dno, a najsitnija zrna prelaziće u naredni konus, odnosno hvataće se u vreći za prašinu.



Sl. 5.45 Šematski prikaz Holtenovog vazdušnog elutriatora. Legenda: 1. Ulaz komprimiranog vazduha i uzorka; 2. Konusne cevi za razvrstavanje materijala po krupnoći, počev od najuže i najduže do najkraće i najšire; 3. Kesa za otprašivanje; 4. Osovina ekscentra vibratora; 5. Drveni ram, nosač uređaja; 6. Ventil

Po izvršenoj elutriaciji, otvaraju se konusi i prazne sadržine u njima, koje su u stvari dobijene klase krupnoće uzorka koji je klasiran ovim postupkom. Za oko 50 g materijala, potrebno je oko 4 časa rada da bi se izdvojilo ukupno sedam klasa krupnoće.

Prednost vazdušnih klasifikatora nad hidrauličnim je u vrlo malom otporu sredine pri kretanju čestice – tokom "sedimentacija", što ima za rezultat kraće vreme analize. Među prvim aparatima ovoga tipa za klasiranje mineralne sirovine primenjen je u Kanadi tzv. infrasaj-

zer, pri klasiranju zlatonosne rude. Vazdušni klasifikator se sastojao od šest međusobno povezanih konusa. Prečnik najmanjeg konusa je 63,5 mm, a najvećeg 508 mm. Konusi su pričvršćeni na drvenom ramu koji se vibracijama, svakih par sekundi, protresa. Suvi materijal za klasiranje, krupnoće -0,074 mm, se ubacuje zajedno sa komprimovanim vazduhom u uređaj i vrši klasiranje. Za 100 g materijala potrebno je oko 1 sat i 20 minuta rada uređaja, ili za klasiranje 0,4 - 3 kg materijala 3,5 - 6 časova.

5.5.4 CENTRIFUGALNI ELUTRIJATOR BAHCO

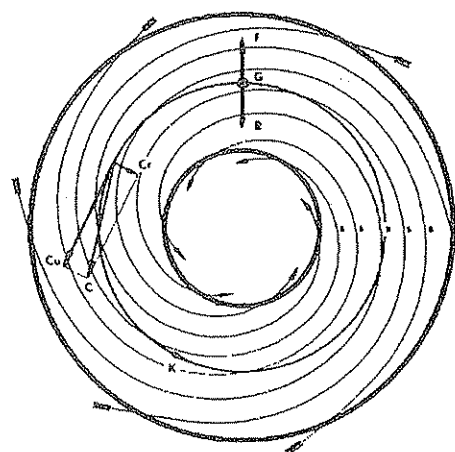
Centrifugalni pneumatski elutriator (separator) "Bahco" primenjuje se za određivanje granulometrijskog sastava uzoraka materijala sitnijih od 0,4 mm, ili za separaciju poliminerálnih zrna po gustini. Šematski prikaz elutriatora dat je na slici 5.47. Analiza se izvodi u vazdušnoj struji i uz pomoć centrifugalne sile. Odvajanje čestica po krupnoći u polju centrifugalnih sila značajno ubrzava proces izdvajanja zahvaljujući činjenici što su sile delovanja na čestice nekoliko stotina do hiljadu puta veće nego gravitaciona sila.

U polju delovanja centrifugalnih sila, Stokes-ov zakon, se može dati izrazom:

$$3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot \rho \cdot v = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot (\rho_m - \rho_g) \cdot \omega^2 \cdot R$$

gde su:

- η - viskozitet sredine;
- v - brzina čestice;
- d - prečnik čestice;
- ω - ugaona brzina čestice;
- R - rastojanje od ose obrtanja do čestice.



Sl. 5.46 Putanje kretanja čestica po Arhimedovoj spirali i pravci delovanja sile na čestice

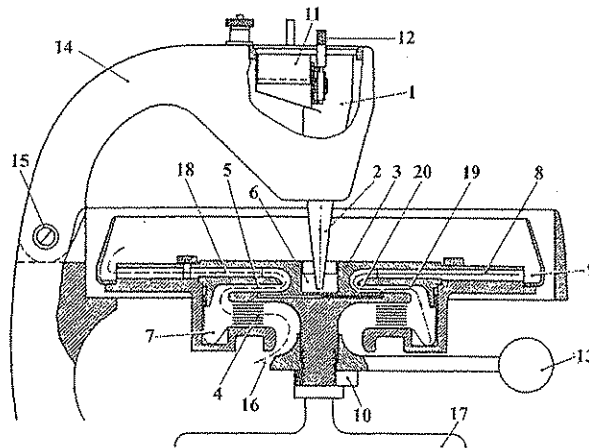
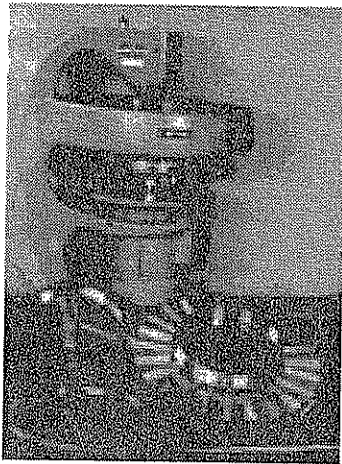
Brzina čestice ($v = dR/dt$) raste kako se čestica približava periferiji. Iz izraza za brzinu možemo dobiti vreme neophodno da čestica prečnika d pređe put od R_1 do R_2 (ilustrovano na slici 5.46), tako imamo:

$$t = \frac{18 \cdot \eta}{d^2 \cdot (\rho_m - \rho_g) \cdot \omega} \cdot \lg \frac{R_2}{R_1}$$

gornji izraz može biti korišćen za određivanje efikasnosti delovanja elutriatora.

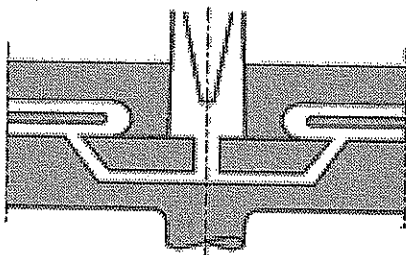
Tablica 5.25 Odnosi krupnoće zrna prema brzini strujanja vazduha, dužini konusa i pojedinim cilindrima klasifikatora

Redni broj konusa	5.	4.	3.	2.	1.
Brzina strujanja	v_5	v_4	v_3	v_2	iv_1
Dužina konusa	l_5	l_4	l_3	l_2	l_1
Odnosi krupnoća čestica	$d_5 / \sqrt{2}$	$d_4 / \sqrt{2}$	$d_3 / \sqrt{2}$	$d_2 / \sqrt{2}$	$d_1 / \sqrt{2}$



Sl. 5.47 Bahco-ov centrifugalni elutriator (separator). Levo: prikaz celog uređaja; desno: poprečni presek. **Legenda:** 1-vibraciona elektromagnetna hranilica; 2-dovodni levak, komora; 3-rotaciona ploča sa ventilatorom; 4-prstenovi; 5-komora za odvajanje finih čestica; 6-otvor gde se uzorak diže u lebdeće stanje; 7- prostor za hvatanje krupnog materijala; 8-smer kretanja sitnih čestica; 9-prstenasti žljeb; 10- potkovičasti elementi za regulaciju protoka vazduha; 11-prihvatni rezervoar; 12-vertikalni regulator; 13-ručica prigušivača; 14-nosač; 15-osovina; 16-usisni otvor i smer kretanja vazduha; 17-postolje; 18-kanali za prolaz vazduha; 19- Smer kretanja materijala.

Iz prihvatnog bunkera 11 (Sl.5.47), pomoću elektromagnetne hranilice 1 uzorak se dozira u komoru 2. Rotor sa ventilatorom 3 rotira brzinom od 3000 o/min i preko prstenova 4 usisava vazduh spolja. Vazduh se kreće po Arhimedovoj spirali (Sl.5.46) i delimično ulazi u komoru za odvajanje 5, a delimično kroz otvor 6 podiže uzorak u lebdeće stanje u komori 2. Iz komore 2 uzorak dospeva u komoru za odvajanje 5 (Sl.5.48). Krupne čestice se odvoje i skupljaju u prostor 7, dok sitne čestice bivaju odnesene vazдушnom strujom kroz otvor 8 i delimično se skupljaju u prstenastom žljebu 9, a jedan deo gubi u okolini. Potkovičastim elementom 10, koji se može menjati u zavisnosti od željene krupnoće razdvajanja, reguliše se protok i brzina vazdušne struje u elutriatoru. Korišćenjem jednog potkovičastog elementa dobijaju se dve klase krupnoće. Analiza započinje sa izdvajanjem najsitnije klase.



Sl. 5.48 Poprečni presek dovodnog kanala i prostora za razdvajanje materijala po krupnoći

Za analizu granulometrijskog sastava uzima se uzorak mase 10 g i isti sipa u prihvatni rezervoar 11. Uključi se rotor i kad dostigne 3000 o/min, pusti se elektro-

magnetna hranilica. Vertikalnim regulatorom 12 podese se protok uzorka, a isti se podešava na 1 g/min. Kada se propusti ceo uzorak isključi se elektromagnetna hranilica, a zatim i rotor elutriatora koji se konačno zaustavlja kočnicom 13. Potom se gornji deo elutriatora podigne oko osovine 15 čime se stvara pristup za skidanje prstenastog žljeba 9 u kome se skuplja sitna frakcija i posude 7 u kojoj se nalazi krupna frakcija. Krupna frakcija se izmeri i vraća u bunker 11. Stavlja se sledeći potkovičasti element za izdvajanje naredne krupnije klase. Dalje se postupak ponavlja do izdvajanja poslednje klase krupnoće. Učešće klase krupnoće -d koja odgovara korišćenom potkovičastom elementu računa se po obrascu:

$$M = \frac{m_1 - m_2}{m} \cdot 100 \quad (\%)$$

gde su:

- M - procentualni udeo klase krupnoće -d;
- m - masa uzorka za analizu;
- m_1 - masa uzorka na kome je vršena analiza, tj. masa uzorka koja je prošla kroz sito otvora 0,4 mm u bunkeru i dospela u elutriator;
- m_2 - masa krupne klase.

Ako u uzorku nema čestica krupnijih od 0,4 mm onda je $m_1 = m$. U tablici 5.26 date su granične veličine čestica u sitnoj klasi pri korišćenju potkovičastog elementa određenog broja, za uzorak gustine 1,00 g/cm³. Za uzorak čija je gustina veća od 1,00 g/cm³, granična veličina čestica u sitnoj klasi, pri korišćenju odgovarajućeg potkovičastog elementa, dobija se iz relacije:

$$d_s = 31,62 \cdot \frac{d_1}{\sqrt{\rho}} \quad (\text{mm})$$

gde je:

- d_1 - granična veličina čestica u sitnoj klasi za uzorak
gustine $1,00 \text{ g/cm}^3$ (mm);
 ρ - gustina uzorka (g/cm^3).

Nedostatak Bahco-vog elutriatora sastoji se u tome što se sitne klase delimično gube sa vazdušnom strujom. Stoga je ovaj elutriator primenljiv samo za određivanje granulometrijskog sastava uzoraka, ali ne i za dobijanje pojedinih klasa krupnoće.

♣ Primer: Način tabelarnog prikazivanja granulometrijskog sastava uzorka kvarcnog peska, sa odgovarajućim proračunima dat je u tablici 5.27.

Tablica 5.26 Granična veličina čestica u sitnoj klasi elutriatora

Broj potkovičastog elementa	Granična veličina čestica u sitnoj klasi d (mm)
18	0,0035
17	0,005
16	0,013
14	0,022
12	0,028
8	0,055
4	0,070
0	0,078

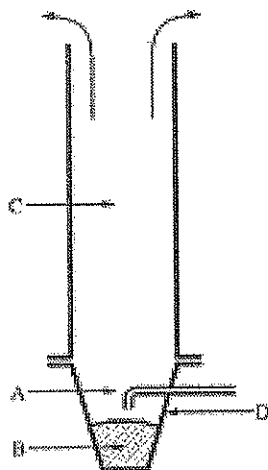
Tablica 5.27 Primer analize granulometrijskog sastava centrifugalnim separatorom Bahco

Broj potkovičastog elementa	Granični sedimentacijski prečnik klase krupnoće, μm		Masa uzorka, g			Maseni udeo klase krupnoće, %	Kumulativni maseni udeo, zrna manjih od d , %
	d' (za $\rho=1,0 \text{ g/cm}^3$)	$d = d' \sqrt{\rho}$ (pri $\rho=2,65 \text{ g/cm}^3$)	Masa polaznog uzorka	Materijal iz sabirnika	Gubitak prašine		
18	3,2	2,0	10,00	8,81	1,19	11,9	11,9
17	5,6	3,4	8,81	7,15	1,66	16,6	28,5
16	9,7	5,9	7,15	4,67	2,48	24,8	53,3
14	14,9	9,1	4,67	2,90	1,77	17,7	71,0
12	23,2	14,2	2,90	1,55	1,35	13,5	84,5
8	45,0	27,6	1,55	0,42	1,13	11,3	95,8
4	56,2	34,4	0,42	0,24	0,18	1,8	97,6
0	68,0	41,6	0,24	0,20	0,04	0,4	98,0
		41,6			0,20	2,0	100,00

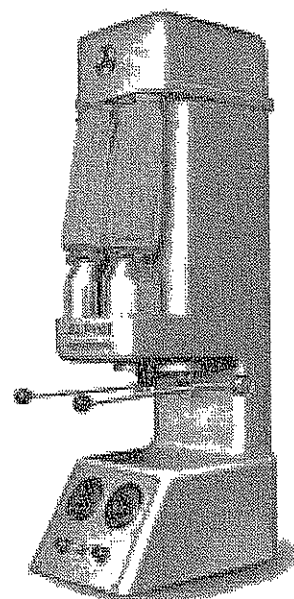
5.5.5 VAZDUŠNI ELUTRIJATOR "ALPINA"

Vazdušni elutriator "Alpina" predstavlja jedan od klasičnih primera, po svojoj konstrukciji i radu, kako funkcionise klasiranje materijala u vazdušnom stubu. Naime princip je vrlo jednostavan. Preko manje količine finosprašenog uzorka, kroz tanku (promenljivu) diznu se iz kompresora ubacuje određena količina vazduha poznate brzine kretanja. Zahvaćene čestice komprimiranim va-

zduhom bivaju ponešene sa dna staklene čašice u vis. (Primer: u staklenu čašu, na čijem se dnu nalazi manja količina brašna, uduvavamo uz pomoć slamke vazduh. Najsitnije čestice će biti odnešene u vis van čaše, a najkrupnije, koje savladaju strujanje vazduha, ostaće na dnu čaše). Sitne čestice bivaju nošene vazdušnom strujom u vis dok će krupnija zrna (veće mase) padati na dno čašice.

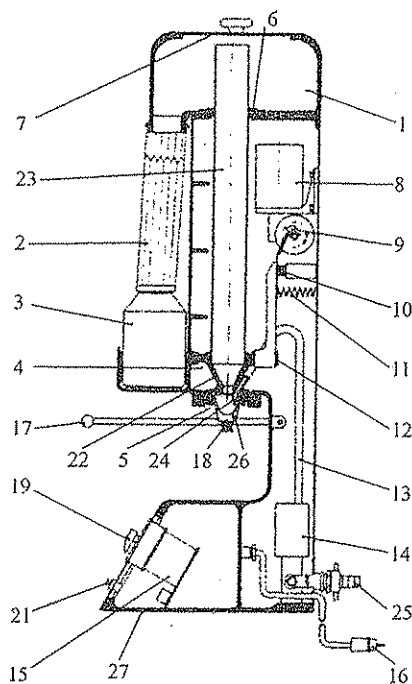


Sl. 5.49 Ilustracija rada elutriatora "Alpina". Legenda: A-Baždarena dizna za dovod komprimiranog vazduha; B-Materijal za klasiranje; C-Kolona za elevaciju materijala; D-Časića - nosač materijala.



Sl. 5.50 Vazdušni elutriator "Alpina" - opšti izgled

Uređaj je tako opremljen da ima ugrađen tajmer, pokazivač pritiska vazduha, a preko jednog ekscentra i čekića se vrše vibracije na vertikalnoj koloni i stresa sa zidova, eventualno nataloženi materijal. U jednom ciklusu uređaj izdvaja dve klase – krupna zrna i sitnija klasa (sitni materijal). U narednom ciklusu, se nakon podešavanja novih uslova rada kao polazni materijal ubacuje predhodno dobijena sitna klasa i postupak ponavlja. Ilustracija rada vazdušnog elutriatora kao i osnovni delovi uređaja dati su na narednim slikama (Sl.5.49; 5.50 i 5.51).

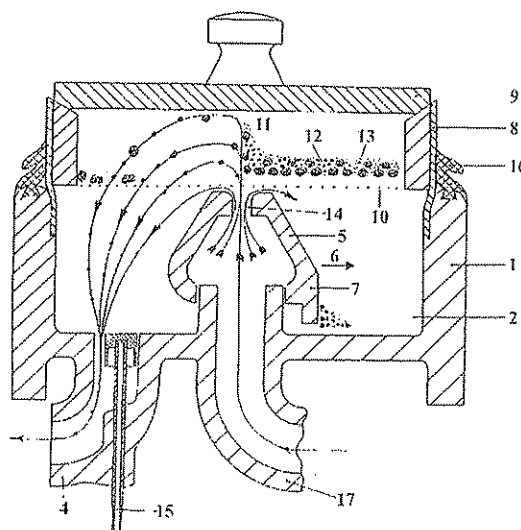
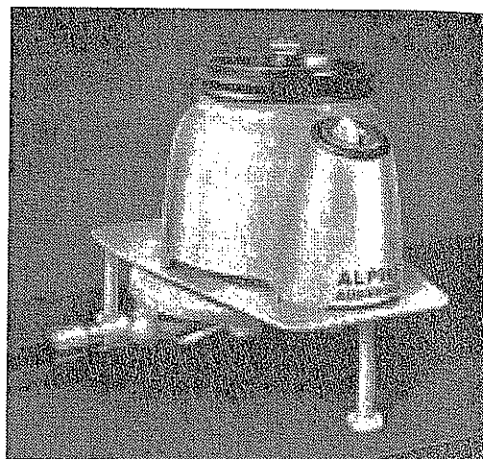


Sl. 5.51 Vazdušni elutriator "Alpina" –poprečni presek.
Legenda: 1-Komora za prašinu; 2-Vreće za prašinu; 3-Posuda za fini materijal; 4-Gumeni amortizer; 5-Semerling; 6-Semerling; 7-Poklopac komore za prašinu; 8-Elektromotor vibratora; 9-Ekscentar vibratora; 10-Graničnik vibratora; 11-Opruga; 12-Čekić vibratora; 13-Dovod vazduha; 14-Magnetni ventil; 15-Satni mehanizam sa relejom; 16-Utikač; 17-Poluga držača posude zarubi materijal; 18-Gumeni amortizer; 19-Prekidač tajmera; 20 i 21- Dugme za uključivanje; 22-Stopa cevi za elevaciju materijala; 23-Cev za elevaciju materijala; 24-Baždarena dizna; 25-Priključak za komprimirani vazduh; 26-Posude za materijal; 27-Kućište.

5.5.6 ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA PNEUMATSKIM SITIMA "ALPINA"

Višegodišnja praktična primena sitovne analize pokazala je da se ručnim i mehaničkim prosejavanjem ne može vršiti analiza granul sastava svih sitnozrnih materijala, pored toga razdvajanje nekih materijala na klase krupnoće metodom prosejavanja zahteva značajan utrošak vremena, a pri tome je reproduktivnost i tačnost analize nezadovoljavajuća. Oдавno su već poznati eksperimenti primene otklona vazdušnom strujom sitnih čestica kroz prosevnu površinu. Prvi eksperimenti ove vrste nisu dali željene rezultate jer su se otvori na sitima vrlo brzo začepili krupnijim zrnima. Ovaj nedostatak bio

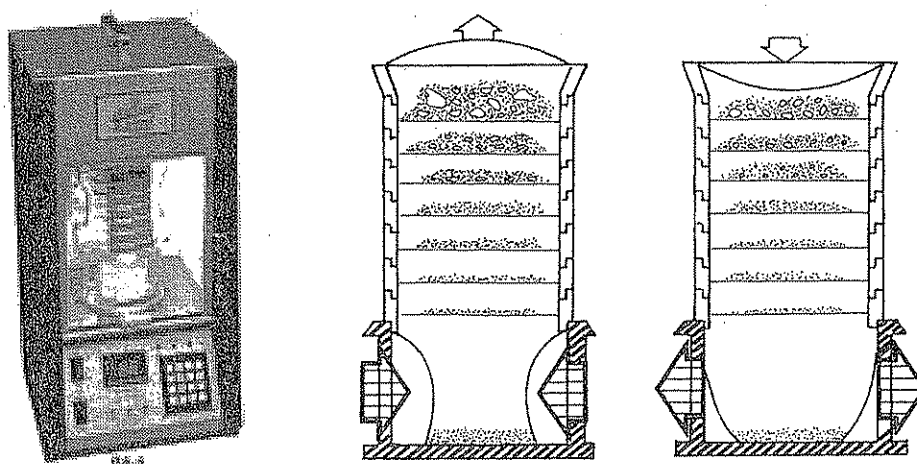
je otklonjen primenom metoda vazdušnog strujanja komprimiranim vazduhom kroz prosevnu površinu (uduvanje i otklona) - pneumatska sita. Naime, vazdušna struja se udvaja sa donje strane sita, nosi sa sobom sitnije čestice, istovremeno rastresajući materijal koji se prosejava na prosevnoj površini (čime se oslobađaju svi otvori), a zatim se iz tog prostora izsisava ubačeni vazduh koji sada pak prolaskom kroz rešetku nosi sobom klasu sitnih čestica praškastog materijala (Sl.5.52). Izsisani sitnozrni materijal hvata se na odgovarajućim filterima (princip usisivača).



Sl. 5.52 Poprečni presek pneumatskog sita "Alpina".
Legenda: 1-Liveno kućište; 2-Cilindrična posuda; 3-Otvor za sitne čestice; 4-Nosač-podupirač; 5-Dizna komprimiranog vazduha; 6-Nosač dizne; 7. 8-Bubanj ili ram sita; 9-Poklopac od pleksiglasa; 10-Prosejna površina; 11-Prostor razdvajanja materijala po krupnoći; 12-Uzorak materijala; 15-Merač pritiska;

5.5.7 GILSON-OVA ULTRAZVUČNA MIKRO SITA

Jedan od novih metoda u granulometrijskoj analizi jeste brzo i efikasno ultrazvučno (sonično) prosejavanje praškastih materijala (Gil Sonic auto Siever). Sonično prosejavanje se uglavnom koristi za suve praškaste materijale od 850 μm do 5 μm . Uzorak nošen u vertikalnom vazdušnom stubu (koloni) koja vibrira podiže čestice, a zatim ih vraća nazad na čijem je putu elektronski perfo-

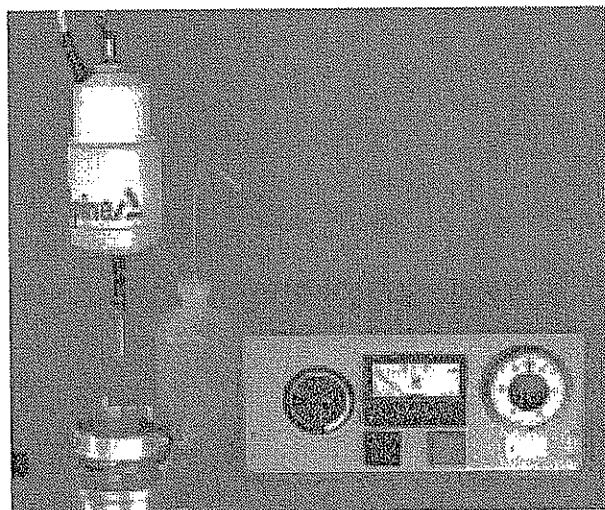


Sl. 5.53 Ilustracija rada Gilson-ovog ultrazvučnog – mikro sita (soničnog prosejavanja)

rirana prosevna površina sita, postupak se odvija pri 3600 pulsacija u minuti. Dodatna vertikalna ili alternativno vertikalno-horizontalni pokreti, odnosno vibracije mogu se koristiti kao pomoć da se prosevne površine oslobode kritičnih zrna (koja začepljuju otvore) ili pak da deaglomerira uzorak (usled moguće aglomeracije elektrostatičim, higroskopnim ili drugim adhezivnim uzorkom). Uređaj (Sl.5.53) se sastoji od serije (7 ili 3 standardna sita) specijalnih providnih akrilnih sita, odnosno ramova na koja su montirani - poklopac kao elastična dijafragma i "čanak" od takođe elastičnog materijala koji ima funkciju kolektora najfinijih čestica.

Pored suvog prosejavanja Gilsonovim ultrazvučnim mikrositima, čuvena firma Alpina je proizvela uređaj za mokro prosejavanje mikrositima uz pomoć visokofrekventnog vibratora (sl.5.54). Koristi se za finopraškaste materijale u kojima preovlađuju čestice ispod 5 μm , pa čak i ispod 1 μm . Količina uzorka za analizu se kreće od 1 g (za čestice ispod 10 μm) i vreme klasiranja od 10–20 min do 10g (za čestice krupnoće 50–100 μm) i vreme klasiranja od 2–4 min.

Uređaj ima regulaciju amplitude vibracija, tajmer, visokofrekventni vibrator sa nosačem mikrosita i sud-čanak za spiranje materijala.



Sl. 5.54 Alpina 75 NS uređaj za mokro ultrazvučno prosejavanje mikrositima.

Ceo uređaj radi potpuno automatski kontrolisan mikroprocesorom, tako što se unapred programiraju - vreme rada, broj i vrsta vibracija. Za određivanje granulometrijskog sastava potrebna je masa od 10 g ili od oko 4 cm^3 materijala, ulaznog uzorka sitnijeg od 38 mm; ili oko 20 g odnosno 7 cm za uzorke krupnijih čestica. Uobičajeno se, ipak, radi sa 1g uzorka. Dok vreme analize zavisi od krupnoće, gustine, strukturnih osobina i količine uzorka. Obično analize traju par minuta, a izuzešno mogu biti i 10 sekundi. Intenzitet vibracija je takođe promenljiv i reguliše se promenom amplitude ultrazvučnih pulsacija.

5.5.8 ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA ELEKTROIMPULSNIM ANALIZATOROM

Metod Coulter-Counter-a. Ovaj metod određivanja granulometrijskog sastava, pomoću elektroimpulsnog analizatora, zasniva se na efektu da se pri prolasku čestice (mineralne sirovine) kroz uski kanal (kapilaru hidrodinamičkog oblika) ispunjenog elektrolitom, menja električna otpornost elektrolita ukoliko se provodljivost čestice razlikuje od elektroprovodljivosti elektrolita. Amplituda električnih impulsa, izazvanih prolaskom čestica, upravo je proporcionalna zapremini čestica, a broj impulsa proporcionalan je broju čestica.

Elektroimpulsni analizator granulometrijskog sastava se sastoji od merne ćelije načinjene od polimetil metalkrilata sa tubusom na čijem se kraju nalazi staklena dijafragma u obliku diska sa kapilarnim otvorima različitih prečnika. U pehar se uspe suspenzija koja se ispituje, i koja se jednom mešalicom održava u stabilnom stanju homogeniziranjem; suspenzija se usisava u meru ćeliju jednom vakum pumpom. Elektrode se postavljaju sa obe strane opisane dijafragme. Brzina toka kontroliše se radiometrom, a vizuelna registracija impulsa prati se na oscilografu. Dimenzije čestica odgovaraju 0,4 - 0,02 dimenzijama otvora na dijafragmi za frakcije manje od 44 μm (ili 0,038 mm i našim laboratorijama).

Pri slobodnom otvoru kapilarne cevi otpornost zavisi od dužine L, poprečnog preseka A i specifične otpornosti elektrolita Q_c :

$$R_o = Q_c L/A$$

otpornost elektrolita ispred otvora, sa obe strane, možemo zbog velikog preseka zanemariti. Ako sada dođe čestica u otvor, zbog smanjene površine preseka povećaće se i otpornost. Neka je dalje čestica cilindričnog oblika i ose paralelne osi kapilarnog prolaza, tada imamo otpornost u mernom otvoru jednaku kao i u delu gde nema čestica:

$$R_1 = Q_e \cdot (L - v/a \cdot A)$$

gde su:

v - zapremina čestice,
a - presek čestice i
v/a - dužina čestice.

Segment u kojem se čestica nalazi ima sledeću otpornost:

$$R_2 = \frac{Q_e \cdot v/a}{(A - a)}$$

gde su:

A - poprečni presek kapilare,
a - poprečni presek čestice.

I stoga je ukupna otpornost jednaka:

$$R = R_1 + R_2 = \frac{Q_e}{A} \cdot \left(L - \frac{v}{a} \right) + \frac{Q_e}{A} \cdot \frac{v/a}{1 - a/A}$$

Posle transformacije i uslova ($a/A < 1$) dobijamo:

$$R = \frac{Q_e}{A} \cdot L - \frac{Q_e}{A} \cdot \frac{v}{a} + \frac{Q_e}{A} \cdot \frac{v}{a} \cdot \left[1 + \frac{a}{A} + \left(\frac{a}{A} \right)^2 + \dots \right]$$

nakon skraćivanja dobijamo:

$$R = \frac{Q_e}{A} \cdot L - \frac{Q_e}{A} \cdot \frac{v}{a} + \frac{Q_e}{A} \cdot \frac{v}{a} \cdot \left[1 + \frac{a}{A} + \left(\frac{a}{A} \right)^2 + \dots \right]$$

$$R = \frac{Q_e}{A} \cdot L - \frac{Q_e}{A} \cdot \frac{v}{a} + \frac{Q_e}{A} \cdot \frac{v}{a} \cdot \left[1 + \frac{a}{A} + \left(\frac{a}{A} \right)^2 + \dots \right]$$

Ukoliko je a/A manje od 1 (gde je $a=1/10 A$, tad je $a/A=0,01$) tako zanemarimo sve članove u zagradi osim prvog, dobijamo:

$$R = \frac{Q_e}{A} \cdot L + \frac{Q_e}{A^2} \cdot v$$

zamenom u jednačinu $R_0 = Q_e L/A$ dobijamo:

$$R = \frac{Q_e}{A} \cdot L + \frac{Q_e}{A^2} \cdot v$$

Povećanje otpornosti zbog prisustva čestice u mernom otvoru je tada jednako:

$$\Delta R = R - R_0 = \frac{Q_e}{A^2} \cdot v \quad \left| : R_0 = Q_e \cdot \frac{L}{A} \right.$$

Ako gornju jednačinu podelimo sa izrazom za R_0 , dobijamo:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{Q_e}{A^2} \cdot v \cdot \frac{A}{Q_e \cdot L}$$

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{v}{A \cdot L}$$

Princip rada uređaja ELZONE. Princip rada uređaja ELZONE (Electrozone sistem) za određivanje krupnoće

i broja čestica, odnosno analizu granulometrijskog sastava se zasniva na sledećem:

Čestice (mineralna zrna) se kreću, tako reći, pojedinačno kroz mali (tečni resistor) osetljivi otvor, prouzrokujući pri tome serije električnih impulsa. Amplituda impulsa je proporcionalna volumenu čestice u električnom polju. Spektar impulsa se pojačava i baždari za granulometrijsku analizu i pojedinačna brojanja. Amplituda svakog impulsa je direkto proporcionalna zapremini čestice, detektovane kao kretanje "električnog polja - omotača" unutar osetljivog otvora, nezavisno od forme, strukture površine, zaobljenosti ili indeksa prelamanja, optičkih osobina, gustine, viskoziteta i dr. Metod se odlikuje vrlo visokom osetljivošću kako na krupnoću čestica tako i na količinu. Zapreminski raspon iznosi 1000 : 1 signala, odnosno 10 : 1 u odnosu na krupnoću čestica (raspon krupnoće se kreće od 0,4 do preko 1000 mm, a osetljivost metode se kreće od 10 do 1000 impulsa u sekundi). Vreme analize je prosečno od 10 do 100 sekundi. Količina 10^4 do 10^6 čestica po analizi daju visoku statističku pouzdanost. Sam otvor senzora je oblikovan u jednu hidrofokusnu formu.

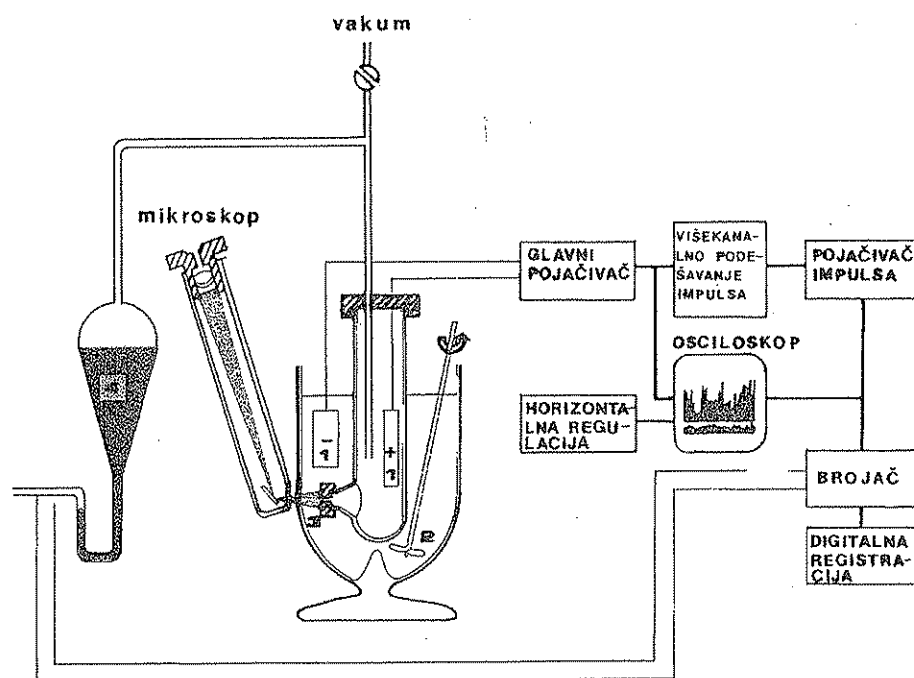
Princip rada se sastoji u tome da se odredi broj i zapremina čestica suspendovanih u elektrolitu dok prolaze kroz kapilarni otvor tubusa zaronjenog u elektrolit. Elektrode su postavljene sa obe strane otvora i kada se čestica nađe u klapalari - otvoru, ona svojom zapreminom istisne određenu količinu elektrolita (vrednost svoje zapremine) što izaziva trenutnu promenu otpornosti merenu na krajevima elektroda. Promena u otpornosti izaziva naponski impuls čija je jačina direktno proporcionalna zapremini čestice. Ovaj naponski impuls se pojačava, meri i broji učestalost da bi se na osnovu toga mogla izračunati veličina i distribucija čestica (po krupnoći) u suspenziji.

5.5.9 ODREĐIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA ILI VELIČINE ZRNA LASERSKIM GRANULOMETROM

Postupak određivanja krupnoće zrna ili čestica, odnosno određivanje granulometrijskog sastava neke sirovine, zasniva se na principu difrakcije svetlosnog snopa - laserskog zraka, pri nailasku na datu česticu. Merenja se mogu vršiti u tačnoj fazi u kojoj su dispergovane čestice u vidu suspenzije ili se mogu vršiti merenja u vazduhu (za određivanje granulometrijskog sastava prašine u vazduhu i slično). Sam naziv metoda (koji inače ima veoma širok spektar primene u različitim oblastima nauke) potiče od "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" - LASER (Pojačani svetlosni snop stimulisane emisije zračenja).

Laserski granulometar sastoji se iz sledećih glavnih delova:

- glavni deo merne jedinice je helijum-neonski laser (5 mW);
- sistem optičkih sočiva za formiranje laserskog snopa;
- merni sudovi: kiveta za suspenziju ili cilindar sa di-znom za dispergovanje praškastog materijala;
- višekanalni fotoelektrični detektor sa mogućnošću razvrstavanja čestica u 31 klasu krupnoće.



Sl. 5.55 Šematski prikaz rada elektroimpulsnog granulometra ELZONE. Legenda: 1-elektrode; 2-mešalica; 3-kapilara.

Merna jedinica sa suspenzijom opremljena je ultrasoničnom kadicom, mešalicom i centrifugalnom pumpom za dispergovanje i transport materijala u tečnosti. U slučaju merenja, određivanja granulometrijskog sastava, suve materije, merna jedinica služi za ravnomerno raspršivanje i doziranje čestica vazdušnom strujom u polje merenja.

Koherentni svetlosni snop, koji dolazi iz laserske diode male snage [Argonski laser, Rubinski laser, YAG laser (yttrium-aluminium-granat) Infracrveni laser, CO₂ laser i dr.], emituje se na talasnoj dužini od 830 nm, prolazi kroz suspenziju u kojoj je dispergovan (praškasti materijal) uzorak, čiju krupnoću čestica određujemo. Rezultat, presecanja svetlosnog snopa nailazećim česticama iz suspenzije, je difrakcija svetlosti. Difrakcija svetlosne energije, prema difraktogramu rasipanja, zavisi od krupnoće čestica sa kojih je rasipanje uzrokovano. Ukoliko su sve te čestice sferične i imaju istu krupnoću, difraktovana svetlosna energija se projektuje i raspoređuje u ravni detektora po određenim zakonitostima (Airy-ova izučavanja), odnosno formira se centralna tačka i serija koncentričnih "krugova" čiji prečnici zavise od krupnoće čestica; tako se projekcija u centru odnosi na čestice, a veći prstenovi na ugao difrakcije.

Specijalno konstruisana silikonska fotodioda, postavljena u žižnu daljinu svetlosnog snopa, registruje raspodelu svetlosne energije po različitim difrakcionim prstenovima.

Postupak izvođenja analize. Uzorak, čiji granulometrijski sastav treba odrediti, se ubacuje u odgovarajuću tečnost i napravi suspenzija. Pomoću cirkulacione pumpe i ultra sonične kadice sa mešalicom kojom se disperguju i deflokuliraju čestice čvrste faze, suspenzija je u stalnom kretanju kroz kivetu u kojoj se vrši merenje. Laserska dioda emituje koherentni snop svetlosti, laserske zrake prihvata sistem optičkih sočiva, nakon čega prolaze kroz kivetu sa suspenzijom čestica čiji nas granulometrijski sastav interesuje. U žižnoj daljini ovih

zraka je detektor - specijalna silikonska fotodioda sa osetljivim ćelijama, na koju se projektuju difrakcioni prstenovi i meri distribucija energije zračenja. Ovi signali što dolaze sa fotodiode, se zatim pojačavaju, odnosno pretvaraju od analognih u digitalne impulse konvertorom, i upućuju u računar na obradu.

Uzorci za spravljanje suspenzije mogu biti monominalni ili smeša čestica različitog sastava i gustina, a potrebno je svega oko 0,1 - 2 g (što bi trebalo da odgovara 0,1 - 0,5 zapreminskih procenata) tako da se analiza može izvesti i sa sasvim malom količinom materijala. Za "suve analize" potrebno je oko 5 - 20 cm³.

Nakon što je uzorak ubačen u ultrasoničnu kadicu sa mešalicom i uspostavljena stabilna suspenzija, samo merenje počinje za svega par sekundi. Nakon oko 20 sekundi rezultati su spremni za obradu. Praktično nema nikakvih ograničenja u primeni različitih tečnosti za suspenziju, a koji pak omogućuju da uzorak materijala ne menja svoje karakteristike krupnoće, kao rezultat bušenja ili rastvaranja. Opseg merenja uvek obuhvata otprilike 2,5 dekada - tako rasponom krupnoće može biti obuhvaćeno, na primer, od 1-145 μm, 5-720 μm ili 8-1160 μm. Prema tome, opseg se može slobodno odabrati između 0,16 i 1160 μm (ili 0,8-1000 μm za suva merenja) sa proizvoljnim brojem intervala (broj klasa krupnoće) jednostavnom promenom merne kivete. U slučaju određivanja granulometrijskog sastava materijala u suspenziji, prvo se vrši takozvano "nulto snimanje" odmah nakon punjenja ultrasonične kadice i protočnog sistema, čistom tečnošću (vodom), a rezultat se odmah memoriše. Nakon ove kratke pripreme uređaj je spreman za merenje. Kod "suve analize" uzorak se kroz levkasti vibrododavač ubacuje u uređaj (bubanj sa rotacionim četkama) za dispergovanje, odakle se kroz jednu diznu ubrizgava u struju vazduha u prostor za merenje - upravan na laserski snop. Sa druge strane vakuum sistemom se odsisava, sakuplja i uklanja sva prašina iz sistema.

Laserski difrakcioni uređaji, nude sisteme za analize sa suspenzijama, sa suvim prahovima, emulzijama i kontinualnim aerosol sprejevima (Sl.5.56 - 5.59).

Francuski proizvođač CILAS (Compagnie Industrielle des Lasers) nudi model CILAS 920, koji je u stanju da meri čestice od 0,7-400 μm , i model HR 850B sub-mikronski granulometar, za čestice u rasponu 0,1-60 μm i u rasponu od 1-1000 μm . Za industrijsku i laboratorijsku primenu.

Princip rada laserskog granulometra se zasniva na kombinaciji difrakcije laserskih zraka pri malim uglovima. Ako se jedna čestica nađe na putu snopa laserske svetlosti tada će se u Fraunhofer-ovoj ravni, sistemom sabiranih sočiva, obrazovati difrakcioni dijagram. Pri čemu, intenzitet i ugaona raspodela difraktovanih zraka zavisi od krupnoće čestica; po principu što su čestice si-

tnije manji je intenzitet i širi ugaon rasipanja. Karakteristika ugaonog rasipanja se može izraziti jednačinom:

$$\sin \theta = \left(\frac{1,22}{d} \right) \cdot \lambda$$

gde su:

θ - polovina ugla prvog difrakcionog minimuma;

λ - talasna dužina;

d - prečnik čestice.

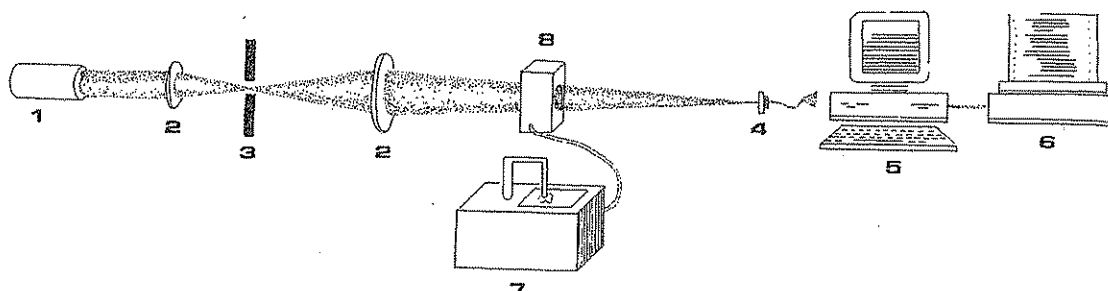
Sumarni intenzitet difrakcionog snopa

$$I = k \cdot n \cdot d$$

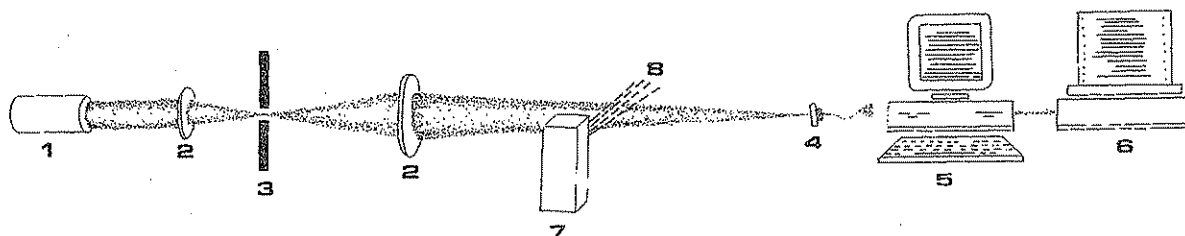
gde su:

k - kalibraciona konstanta;

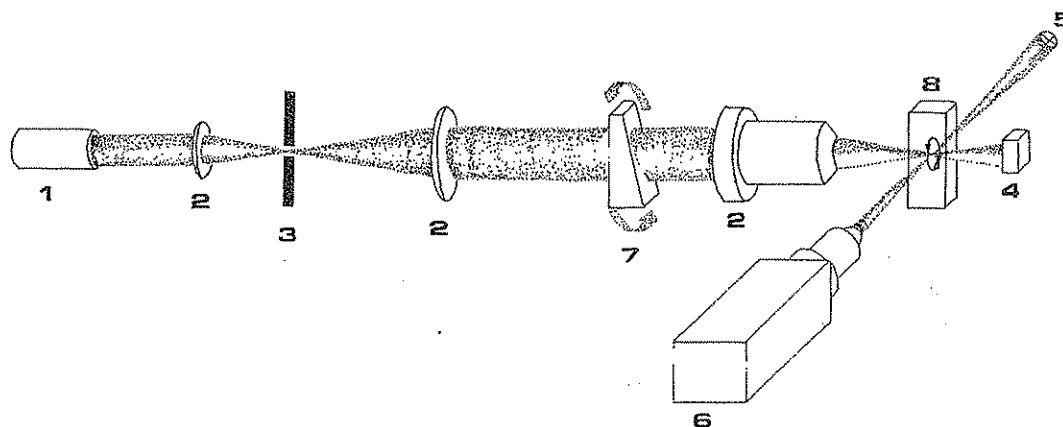
n - broj čestica.



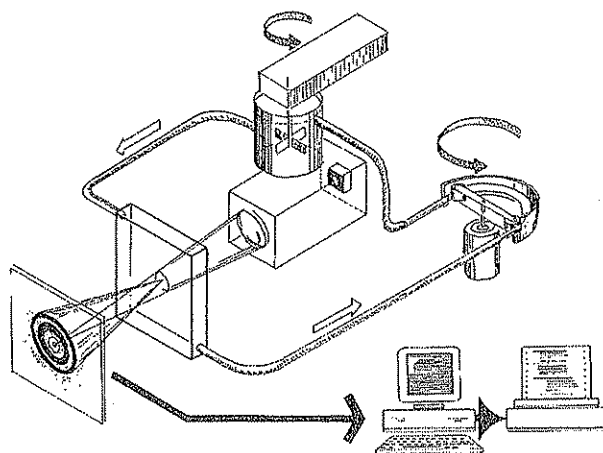
Sl.5.56 Princip rada laserskog granulometra za analize granulometrijskog sastava čestica dispergovanih u tečnoj fazi - suspenzijama. **Legenda:** 1.Izvor uskog laserskog snopa svetlosti; 2.Optičko sočivo; 3.Dijafragma; 4.Detektor, fotoosetljivi element; 5.Računar sa mikroprocesorom; 6.Štampač; 7.Ultrazvučna kadica sa mešalicom za suspenziju; 8.Kiveta za analizu.



Sl.5.57 Princip rada laserskog granulometra za analize granulometrijskog sastava čestica dispergovanih u vazduhu - spreju (čvrsto-gas), ili kao aerosoli (tečno-gas). **Legenda:** 1.Izvor uskog laserskog snopa svetlosti; 2.Optičko sočivo; 3.Dijafragma; 4.Detektor, fotoosetljivi element; 5.Računar sa mikroprocesorom; 6.Štampač; 7.Izvor raspršenih čestica nošen komprimovanim vazduhom, ili sprej sa aerosola.



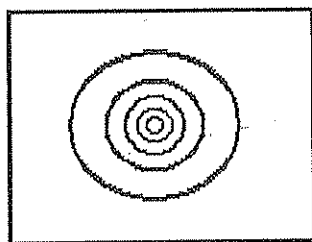
Sl.5.58 Princip rada laserskog granulometra za analize granulometrijskog sastava čestica dispergovanih u tečnoj fazi - suspenzijama, sa ugrađenom TV-kamerom i mogućnošću praćenja analize na monitoru. **Legenda:** 1.Izvor uskog laserskog snopa svetlosti; 2.Optičko sočivo; 3.Dijafragma; 4.Detektor, fotoosetljivi element; 5.Izvor obične svetlosti za osvetljavanje kivete; 6.TV-kamera; 7.Rotaciona prizma; 8.Kiveta za analizu.



Sl.5.59 Ilustracija funkcionisanja laserskog granulometra za analize granulometrijskog sastava i osnovni delovi. **Legenda:** 1.Izvor uskog laserskog snopa svetlosti; 2.Optičko sočivo; 3.Dijafragma; 4.Detektor, fotoosetljivi element; 5.Računar sa mikroprocesorom; 6.Štampač; 7.Ultrazvučna kadica sa mešalicom za suspenziju; 8.Kiveta za analizu.

Ukoliko se na Fraunhofer-ovoj ravni sistem sabirnih sočiva postavi specijalni filter, tada intenzitet transformisane rasejane svetlosti može biti proporcionalan prečniku čestice na bilo koji stepen (d^4 , d^3 , d^2).

Svetlost, rasejana česticama iz suspenzije, skuplja se sistemima optičkih sočiva i fiksira na rotacionom prostornom filteru.



Sl.5.60 Fraunhofer-ovi difrakcioni prstenovi.

Ako su sferične čestice obasjane sa paralelnim zracima, monohromatskom svetlošću, difrakcioni dijagrami, nazvani Fraunhofer-ovi difrakcioni dijagrami po svom pronalazaču, se pojavljuju u ravni žižne daljine sočiva postavljene iza njega. Prema tome, ovo je rezultat interferencije talasnih dužina difraktovanih sa rubova čestica. Difrakcioni dijagrami se sastoje od naizmenično poređanih svetlih i tamnih prstenova (Sl.5.60). Radijus R_0 prvog tamnog prstena može se izračunati koristeći se jednačinom

$$R_0 = \frac{1,22 \cdot f \cdot \lambda}{D}$$

gde je: D – prečnik diska.

5.5.10 IZRAČUNAVANJE EKVIVALENTNIH PREČNIKA

Sedimentacijskim metodama se izdvajaju klase krupnoće koje odgovaraju samo mineralu prema kome je vršeno klasiranje (čija je gustina korišćena pri izračunavanju konačne brzine padanja). Za sve ostale minerale prečnici zrna biće manji ili veći u zavisnosti od njihove gustine. Zajedničko za sve izdvojene minerale u jednoj klasi je ista konačna brzina padanja v_0 . Koeficijent jednakog padanja predstavlja odnos prečnika dva zrna različite gustine koji sedimentiraju u suspenziji jednakom brzinom.

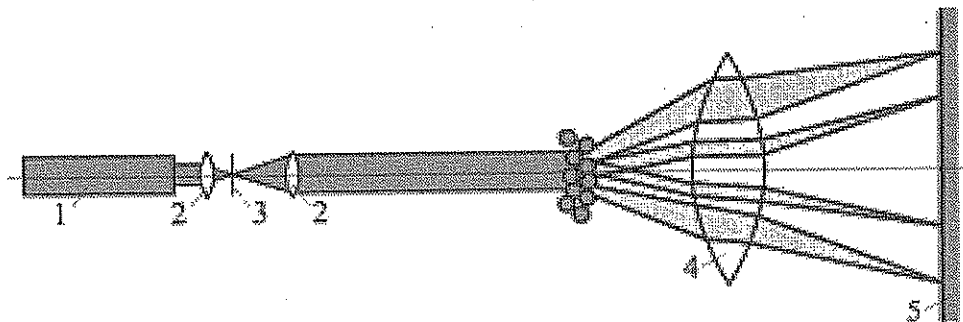
Ako su: ρ_1 i ρ_2 gustine dva jednako padajuća zrna $\rho_2 > \rho_1$ ($v_{01} = v_{02}$); d_1 i d_2 odgovarajući prečnici ovih zrna, v_{01} i v_{02} njihove konačne brzine padanja u vodi, prema jednačini Stokes-a dobija se

$$v_{01} = k_1 \cdot d_1 (\rho_1 - \rho_f)$$

$$v_{02} = k_1 \cdot d_2 (\rho_2 - \rho_f)$$

za $v_{01} = v_{02}$ sledi

$$k_1 \cdot d_1 (\rho_1 - \rho_f) = k_2 \cdot d_2 (\rho_2 - \rho_f)$$



Sl.5.61 Prikaz difrakcije laserskog zraka pri nailasku na česticu, funkcionisanje Fourier-ovog transformacionog sočiva i formiranje difrakcionih prstenova na ravni detektora (sistema fotoosetljivih elemenata). **Legenda:** 1-He/Ne laser; 2-Optičko sočivo; 3-Dijafragma; 4-Fourier-ovo transformaciono sočivo; 5-Fotoosetljivi element na koji se projektuju difrakcioni prstenovi.

$$\frac{d_1}{d_2} = \sqrt{\frac{k_2 \cdot (\rho_2 - \rho_f)}{k_1 \cdot (\rho_1 - \rho_f)}}$$

znajući da je $k_1 = k_2$ dobijamo

$$\frac{d_1}{d_2} = \sqrt{\frac{(\rho_2 - \rho_f)}{(\rho_1 - \rho_f)}}$$

Koeficijent jednakog padanja kod sitnih zrna obrnuto je proporcionalan kvadratnom korenu iz gustine minerala umanjene za gustinu fluida. **Primer:** uzorak olovno-cinkove rude klasiran jednim od sedimentacijskih postupaka, sadržao je sledeće minerale sa odgovarajućim gustinama galenit (7,50) sfalerit (4,20) i kvarc (2,65). Izdvojena je klasa krupnoće 0,020 mm. Klasiranje je vršeno sedimentacijom u vodi prema gustini galenita (7,50). Koja je veličina zrna sfalerita i kvarca u izdvojenoj klasi krupnoće?

Zamenom u jednačinu koeficijenta jednakog padanja, izračunaćemo prečnike čestica ostala dva prisutna minerala.

$$\frac{d_1}{d_2} = \sqrt{\frac{(\rho_2 - \rho_f)}{(\rho_1 - \rho_f)}}$$

Za sfalerit dobijamo $d_2=0,028$ mm; za kvarc dobijamo $d_3=0,039$ mm.

Tablica 5.28 Postavka zadatka pri izračunavanju ekvivalentnih prečnika

Galenit	Sfalerit	Kvarc
$\rho_1 = 7,50 \text{ g/cm}^3$	$\rho_2 = 4,20 \text{ g/cm}^3$	$\rho_3 = 2,65 \text{ g/cm}^3$
$d_1 = 0,020 \text{ mm}$	$d_2 = ?$	$D_3 = ?$

Ilustriramo rezultate klasiranja Pb-Zn sirovine, u kojoj su pomenuti minerali, ako sirovina predstavlja prosej sita 0,074 mm, dobijen mokrim prosejavanjem. Sedimentacijskom analizom mogli bi smo dobiti ovakve rezultate (Tablica 5.29)

Tablica 5.29 Izračunate krupnoće zrna minerala u analiziranoj sirovini

Klase krupnoće	Galenit	Marmatit	Kvarc
I klasa	-0,074+0,037	-0,074+0,055	-
II klasa	-0,037+0,018	-0,055+0,024	-0,074+0,034
III klasa	-0,018+0,006	-0,024+0,010	-0,034+0,014
IV klasa	-0,006+0,004	-0,010+0,007	-0,014+0,010
V klasa	-0,004+0,000	-0,007+0,000	-0,010+0,000

5.6 MIKROSKOPSKE METODE MERENJA VELIČINE MINERALNIH ZRNA

5.6.1 OPTIČKI MIKROSKOP

Jedan od najtačnijih postupaka određivanja krupnoće čestica je uz pomoć optičkog mikroskopa, korišćenjem okular-mikrometerske skale kojom se vrši samo merenje dimenzija čestica. Okular, koji se koristi pri ovakvim merenjima je opremljen skalom, čije podeoke je neophodno pre samog korišćenja izbaždari, odnosno utvrditi tačnu dužinu za određenu kombinaciju uvećanja okulara, objektiva i tubusa mikroskopa.

Sam postupak merenja zahteva znatno vremena i stoga se baždareni razmernik (okular-mikrometerska skala) koristi kod merenja kod kojih se ne zahteva izuzetna preciznost dimenzija čestica i koja nisu brojna. Podeoci skale okularmikrometra mogu biti markirani u aritmetičkoj ili geometrijskog podeli. Određivanje krupnoće, pomoću ovakve skale, sastoji se u poređenju date dimenzije čestice sa određenim brojem podeoka na skali i uvršćivanjem podataka u odgovarajuću klasu krupnoće.

Postupak određivanja krupnoće čestica po klasama je relativno jednostavan, brz i prilično tačan. Međutim, postupak merenja tehnikama optičke mikroskopije može da se znatno ubrza ukoliko se slika vidnog polja izdela na određene subpovršine. U tu svrhu postoji specijalni dodatak - prizma, koji se lako montira na konvencionalne mikroskope.

Merenje dimenzija mineralnih zrna (ili veličine prožilaka, agregata, inkluzija i dr.) je od velikog značaja pri analizi granulometrijskog sastava ili, uopšte pri karakte-

rizaciji strukturnih i teksturnih osobina sirovine posebno tokom praćenja oslobađanja minerala u procesima PMS na usitnjennoj sirovini.

Način izvođenja merenja pomoću okular-mikrometra. U ravni žižne daljine okular-mikrometra postavljena je staklena pločica na kojoj je ugraviran razmernik dužine 1 cm podeljen na 10 odnosno 100 delova. Prstenom koji nosi sočivo okulara izoštrimo u vidnom polju skalu mikrometra, zatim određujemo broj podeoka na okular-mikrometerskoj skali koji odgovara željenoj dužini. Svaki deo okular-mikrometerske skale odgovara pri datom uvećanju određenoj veličini koja je utvrđena – baždarenjem pri određenim uvećanjima mikroskopa. Za određivanje veličine podeoka na okular-mikrometru, za baždarenje koristi se takozvani objekt-mikrometar. On je predstavljen staklenom ili ispoliranom metalnom pločicom na čiju je površinu urezana duž veličine 1 mm i podeljena na 100 delova. Pri određivanju veličine podeoka na okular-mikrometerskoj skali, objekt-mikrometar se postavlja na stočić mikroskopa umesto poliranog preparata i upare se "nule" obe skale, a zatim izbroji određeni broj (10 ili 20) podeoka skale objekt-mikrometra i odgovarajući broj podeoka okular-mikrometra. Na ovaj način se određuje veličina jednog podeoka okular-mikrometra.

* **Primer.** 14 podeoka okular-mikrometerske skale odgovara 16 podeoka objekt-mikrometerske skale; kako svaki podeok objekt-mikrometra iznosi 0,01 mm, to će 1 podeok okular-mikrometerske skale biti ravan $0,16/14=0,011$ mm.

Radi lakšeg i bržeg praktičnog rada, korisno je unapred sastaviti tablicu sa vrednostima podeoka okular-mikrometerskih skala za različita uvećanja mikroskopa (kombinacija okular + objektiv). U narednoj tablici prikazane su vrednosti veličine podeoka pri različitim uvećanjima za mikroskop tipa MIN-9, na kojem se obavlja vežbe naših studenata.

Tablica 5.30 ilustruje izračunavanje vrednosti jednog podeoka okular-mikrometerske skale pri uvećanju okulara od 7x i različitim uvećanjima objektiv (MIN-9).

Tablica 5.30. Ukupna uvećanja mikroskopa pri različitim kombinacijama okular-objektiv.

Uvećanje okulara	UVEĆANJE OBJEKTIVA				
	4,7 x	9 x	11 x	21 x	30 x
7 x	35 μ m	18 μ m	15 μ m	8 μ m	5 μ m

5.6.2 ELEKTRONSKI MIKROSKOP

Određivanje krupnoće, odnosno dimenzija čestica elektronskim mikroskopom se obično izvodi merenjem likova na slikama na fotografskim pločama, filmovima ili fotografijama. Fluorescentni ekran se retko koristi za neposredna merenja zbog niskog intenziteta osetljivosti i mogućnosti oštećenja uzorka koji se analizira pri dužem bombardovanju elektronima.

Slike na pločama i filmovima se mogu projektovati na ekran radi merenja. Definicija krupnoće čestica i metodi merenja, odnosno njihova klasifikacija su identični onima u optičkoj mikroskopiji. Jedan od najčešćih nedostataka merenja krupnoće čestica uz pomoć elektronskog mikroskopa posledica je ispitivanja suviše malog broja vidnih polja (relativno male površine uzorka usled velikog uvećanja).

Za dobijanje tačnih rezultata merenja pribegava se radu na pločama ili fotografijama snimljenih na većem broju vidnih polja analiziranog uzorka. U slučaju kada imamo uzorak sa širokim rasponom krupnoće dimenzija čestica, neophodno je koristiti i optički i elektronski mikroskop. U takvim slučajevima posebnu pažnju treba obratiti na izvesne poteškoće zajedničkog prikazivanja rezultata dobijenih ovim postupcima usled razlika u greškama koje nose ova dva instrumenta. Greška se može minimizirati merenjem čestica koje su veće od granice rezolucije optičkog mikroskopa na oba instrumenta.

5.6.3 ANALIZATOR SLIKE

Određivanje krupnoće čestica mikroskopom zahteva brojanje i obradu velikog broja podataka što pak vodi

poskupljenju analize, dugo traje a sam postupak je podložan subjektivnim greškama. Korišćenjem savremenih analizatora slike izbegava se spora i često dosadna procedura brojanja i merenja s jedne strane, dok istovremeno analizatori slike, s druge strane, pružaju kompletne podatke o distribuciji krupnoće i oblika čestica za daleko kraće vreme od onoga koje bi inače bilo potrebno kod konvencionalnih metoda. Prema definiciji analiza slike predstavlja kvantitativnu analizu numeričkih, geometrijskih i podataka o učestalosti bilo sa mikroskopskih ili makroskopskih predmeta.

Danas postoji veći broj proizvođača ovih instrumenata, međutim, zajedničko za sve analizatore slika je da se oni sastoje od dve celine, pored, naravno, samog mikroskopa. Prvog, dela za pretvaranje optičke slike u električne impulse (konvertor signala) i drugog, dela koji služi za analizu električnih impulsa koji generišu kvantitativne informacije u vidu slika. Donja granica krupnoće čestica, koje mogu biti analizirane analizatorima slike uslovljena je rezolucijom (razdvojnomoć) samog mikroskopa, tako da čestice reda 0,01 mm mogu biti analizirane uz pomoć skenirajućeg elektronskog mikroskopa.

Razdvojna moć. Količina detalja koja se može videti u jednom liku se zove rezolucija. - Oko može razlikovati objekte međusobno udaljene do 0,25 mm pre nego što mu se objekti stoje. - Optički mikroskop može razlikovati objekte međusobno udaljene 0,00025 mm. - Elektronski mikroskop može da razlikuje objekte međusobno udaljene 0,000 000 5 mm.

Savremenim analizatorom slike danas je moguće dobiti čitav niz podataka karakterizacije čestica, gde su najčešće obuhvaćeni: konture čestice (ocrtavanje spoljašnjeg ruba), oblika, površina, orijentacija, sklop, odnos najkraćih prema najdužim dimenzijama, distribucija pojedinačnih faza u svakoj pojedinačnoj čestici i dr. Ovakav uređaj se može koristiti za ocenu intenziteta srastanja različitih minerala u sirovini i izračunavanje krupnoće do koje je sirovinu neophodno usitniti (samleti) da bi se dati minerali oslobodili.

Čestice koje će biti analizirane predhodno se osmotre mikroskopom i optička slika se projektuje na skener da bi se proizveli električni impulsi. Intenzitet ovih impulsa zavisi od nivoa, intenziteta sivih tonova slike (savremeni sistemi mogu da razlikuju 256 nivoa sivog). Različiti minerali ili mineralne faze (konstituenti sirovina) se na taj način mogu međusobno razlikovati. Izazvani električni impulsi se ravnomernim skeniranjem analiziraju pri visokim rezolucijama, a računar vrši obradu podataka. Analizator slika može, umesto skenirane slike sa mikroskopa, da obrađuje i podatke sa filma - video traka, slajdova, magnetnih traka i dr., kao ulaznih podataka. Kompletna analiza može biti izvršena za nekoliko minuta.

5.7 LITERATURA

1. Allman, M., Lawrence, F. D., 1981: Geological Laboratory Techniques; Arco Publishing Company, INC., New York.
2. Kouzov, P. A., 1987: Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pylei i izmel'chenn'kh materialov, - Himija, Leningrad.
3. Milosavljević, R., 1974: Metode ispitivanja mineralnih sirovina u PMS, - Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
4. Mitrofanov, S. I., Barskii, L. A., Samygin, V. D., 1974: Issledovanie poleznykh iskopayemykh na obogatimost', Nedra, Moskva.

SADRŽAJ GLAVE 6

6.1 OSLOBAĐANJE MINERALA	205
6.1.1 Uvod.....	205
6.1.2 Oslobađanje minerala	206
6.1.3 Strukturne karakteristike i oslobađanje	208
6.1.4 Modeliranje mineralne sirovine	212
6.1.5 Integralnost modela kinetike mlevenja i oslobađanja minerala	213
6.1.6 Osobine relativne meljivosti minerala i finoća mlevenja sirovine	214
6.1.7 Model oslobađanja	215
6.1.8 Značaj izbora postupka oslobađanja	228
6.1.9 Određivanje oslobođenosti i kompatibilnost postupaka	229
6.1.10 Kompatibilnost modela oslobađanja	230
6.1.11 Utvrđivanja oslobođenosti uz pomoć stereobinokularnog mikroskopa	234
6.1.12 Utvrđivanja oslobođenosti rudnim polarizacionim mikroskopom	236
6.1.13 Integralni stepen oslobođenosti	244
6.1.14 Pojave stadijnosti oslobađanja minerala u procesu mlevenja.....	244
6.1.15 Gradijenti priraštaja oslobađanja minerala.....	244
6.2 LITERATURA	245



6.

Gl
mi
ne
mj
us
se
vir
ag
str
ml
nja
sn
stz
kri
mi
on
va

ob
po
tuj
zu

jal
da
mo

čū
lik
no
vrl
sla
jal
lor
do
ve
lot

GLAVA 6

6.1 OSLOBAĐANJE MINERALA

6.1.1 UVOD

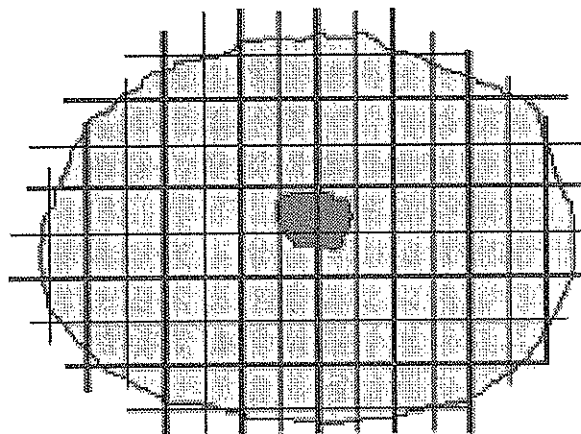
Glavni zadatak usitnjavanja, u procesima koncentracije mineralnih sirovina je oslobađanje ili "izbavljanje" minerala, nosioca elemenata - metala ili jedinjenja, iz kompleksnih sirovina, ali tako da pri tome, krupnoća zrna usitnjene sirovine ostane što je moguće veća. U praksi se potpuna oslobođenost retko postiže, čak i kad se sirovina usitni do krupnoće zrna koja su manja od samih agregata kristala korisnog minerala. Ovo možemo ilustrovati slikom 6.1 koja predstavlja komad sirovine lomljen do određene krupnoće (prvi stadijum usitnjavanja), i pošto nije dao zadovoljavajuće oslobađanje korisnog minerala, usitnjavanje je nastavljeno kroz drugi stadijum, do optimalnog oslobađanja. Ovdje će, naravno, krupnoća mineralnih zrna - agregata kristala - korisnog minerala, koja nastaje usitnjavanjem imati, praktično, onu gornju krupnoću, koja će biti u skladu sa zadovoljavajućim stepenom oslobađanja.

Zahtev da krupnoća zrna ostane što je moguće veća objašnjava slika 6.2, koja prikazuje orijentaciono, raspone krupnoća zrna sirovine, uslovljene različitim postupcima koncentracije, pri kojima se postižu najbolji rezultati i značajne prednosti jednih nad drugima.

Zrna koja se sastoje od željenog minerala i minerala jalovine predstavljaju sraslace - srasla zrna, a dodatno dalje oslobađanje korisnog minerala iz ove krupnoće se može postići dodatnim usitnjavanjem (domeljavanjem).

Stepen oslobođenosti predstavljen je odnosom količinske zastupljenosti datog minerala koji se javlja u obliku slobodnih zrna prema njegovoj ukupnoj zastupljenosti u sirovini (slobodna i srasla zrna). On može biti vrlo visok ukoliko su veze korisnog minerala i jalovine slabe. Međutim, češće, atehzione sile između minerala i jalovine su jake, tako da tokom usitnjavanja dolazi do lomljenja sirovine po različitim pravcima preko ravni dodira mineralnih konstituenata, što dovodi do stvaranja veće količine sraslih zrna i niskog stepena oslobođenosti minerala.

Naravno, vrlo je teško direktno odrediti stepen oslobođenosti minerala dobijenih tokom usitnjavanja. Međutim, kako je veličina oslobođenosti u neposrednoj vezi sa krupnoćom zrna usitnjavane sirovine, šemom mlevenja se, pri projektovanju, predviđa da krupnoća u izlazu ne bude veća od te neke unapred određene krupnoće.



Sl. 6.1 Ilustracija komada sirovine sa mineralima jalovine i agregatom kristala korisnog minerala koji se može "osloboditi" sistemom fraktura u dva stadijuma usitnjavanja.

U praksi, svaka data sirovina se usitnjava do izvesne optimalne krupnoće, koja se određuje tokom laboratorijskih ispitivanja (opiti mlevenja) i rada u poluindustrijskom postrojenju, kako bi se postigao ekonomičan stepen oslobođenosti minerala. Važno je da ovaj široki raspon krupnoće, usitnjene sirovine, bude poznat unapred, odnosno da se stalno prati kako bi se mogli odrediti svi potrebni podaci za budući proces. Zatim se projektuje takav tehnološki proces koji će dati koncentrat u kome će preovladivati željeni - korisni mineral, sa jednom prihvatljivom količinom sraslih zrna (sa minerali-

ma jalovine), koja zahtevaju dodatno usitnjavanje (najčešće domeljavanje međuproizvoda) kako bi se postiglo optimalno oslobađanje minerala. Jalovina pak treba da bude sastavljena pretežno od nepoželjnih minerala (petrogenih). (Sl.6.3)

U postupku usitnjavanja siromašnih ruda pretežni deo minerala jalovine je često oslobođen već pri relativno grubom usitnjavanju. U takvim situacijama može biti ekonomično prvo sirovinu grubo usitniti, do krupnoće koja je znatno veća od optimalne, sa ciljem da se veliki deo jalovine može odstraniti već pri gruboj usitnjenosti sirovine, a da u sledeći stadijum procesa koncentracije odlazi manji deo sirovine - sraslih zrna. Ovim postupkom se jedan veliki deo relativno krupnije usitnjene jalovine odstranjuje iz daljeg procesa, što nesumnjivo snižava troškove usitnjavanja a nepotrebno usitnjavanje oslobođene jalovine je time izbegnuto.

Sa aspekta PMS, posebno flotacijske koncentracije, ali i drugih postupaka, oslobađanje minerala se može predstaviti na krajnje jednostavan način. Na slici 6.4 prikazana su zrna - proizvodi koncentracije jedne sirovine: koncentrat, međuproizvod i jalovina, razdvojeni linijama *a* i *b*, koje na odgovarajući način markiraju procese koncentracije (flotacijske, magnetske, gravitacijske itd.), odnosno mesto razdvajanja mineralnih zrna. Pored toga, srasla zrna, koja zahtevaju dodatno usitnjavanje sa

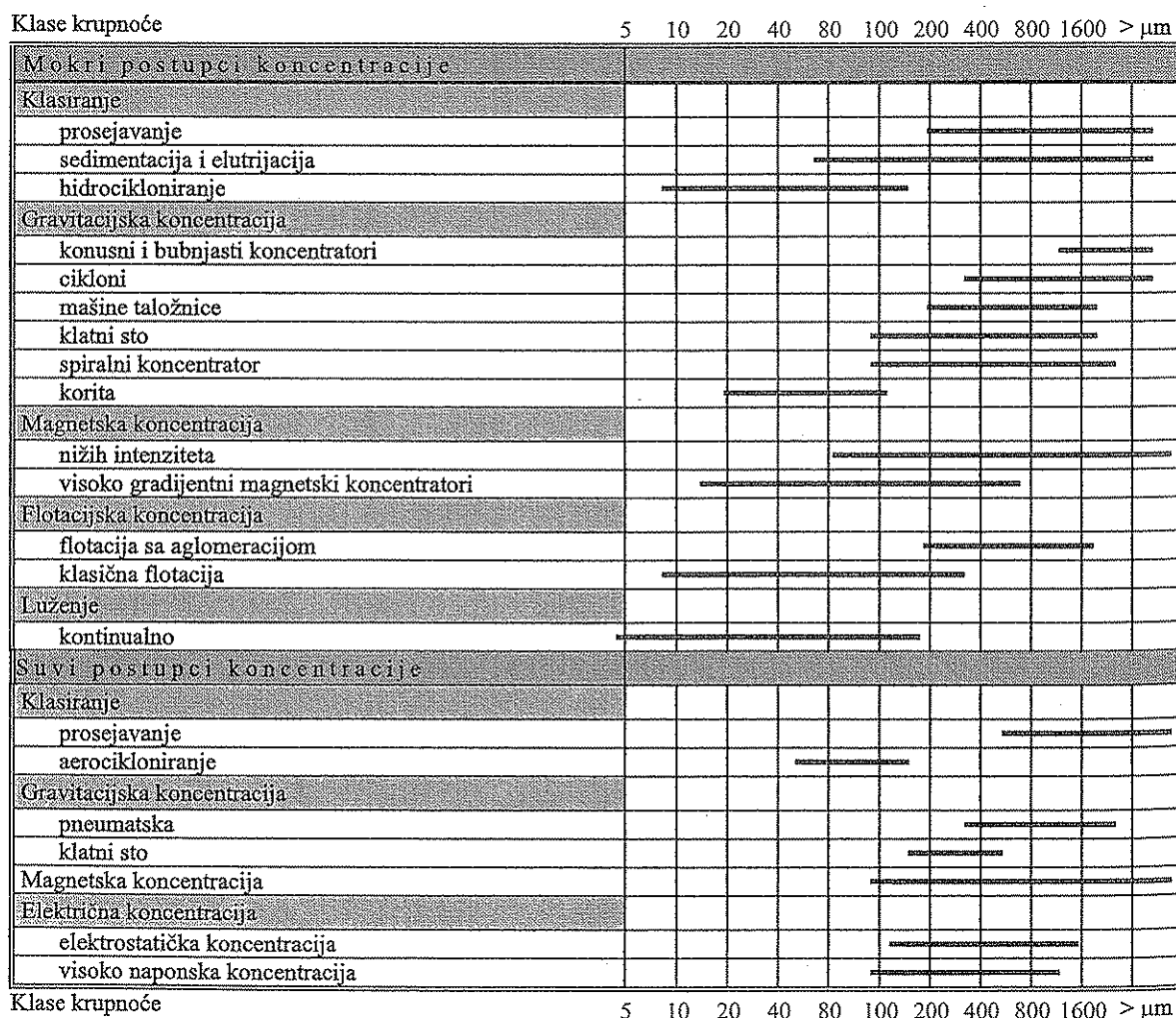
ciljem daljeg oslobađanja, mogu biti sa različitim međusobnim odnosima mineralnih faza i da pri tome imaju različite strukture - prostorni razmeštaj konstituenata.

Na ovaj način prikazani proizvodi koncentracije pokazuju realnu situaciju - da nisu sva zrna u koncentratu slobodna, kao ni ona u jalovini.

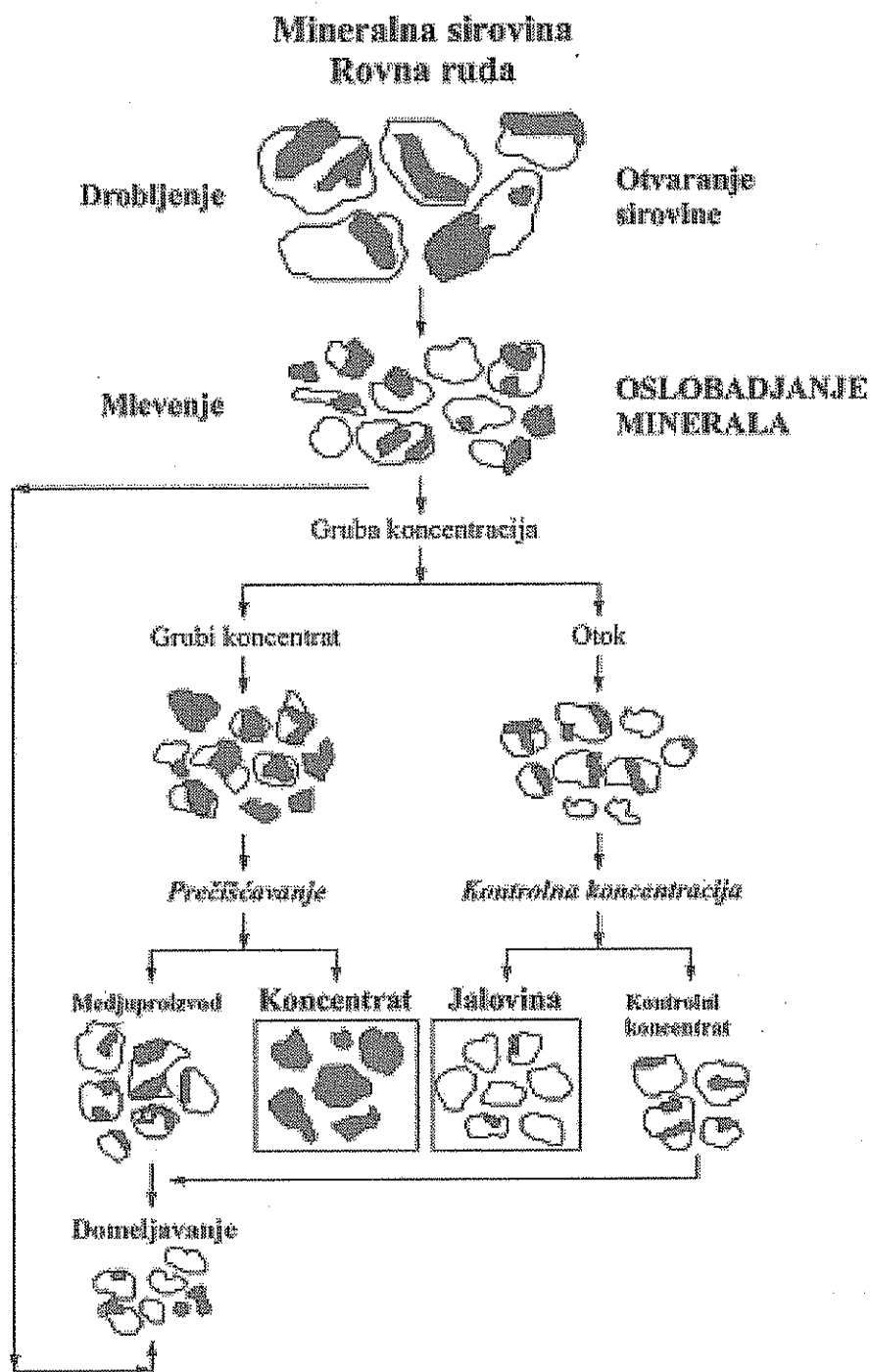
6.1.2 OSLOBAĐANJE MINERALA

Ako se usitnjavanje sirovine vrši radi pripremanja iste za proces koncentracije, onda se ono naziva i "otvaranje", a pri tome se sami minerali "oslobađaju". Ovi nazivi potiču od cilja usitnjavanja, koji se tada svodi na oslobađanje zrna pojedinih minerala od njihovih međusobnih veza. Drugim rečima, sa smanjenjem krupnoće, zrna pojedinih minerala u sirovini postaju "slobodna" i mogu se razdvojiti u procesu koncentracije. Pod "slobodnim" zrnom podrazumevamo zrno koje se sastoji od jedne mineralne komponente. Zrna koja se sastoje iz dve ili više mineralnih komponentata nazivamo srasla zrna ili sraslaci (Magdalinović, 1991.).

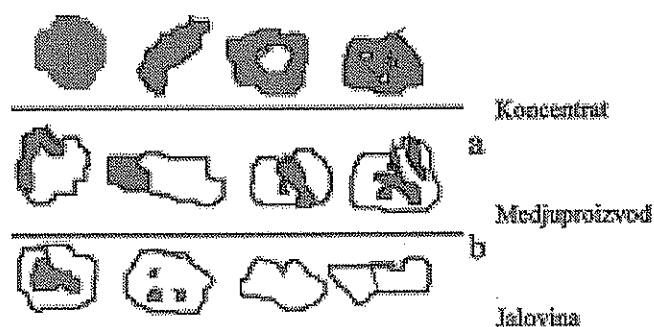
Procesi obuhvaćeni tretiranjem skupa prirodnih mineralnih asocijacija se najlakše mogu predstaviti kao na Sl.6.5. Uočavaju se tri glavna ciklusa u procesima PMS.



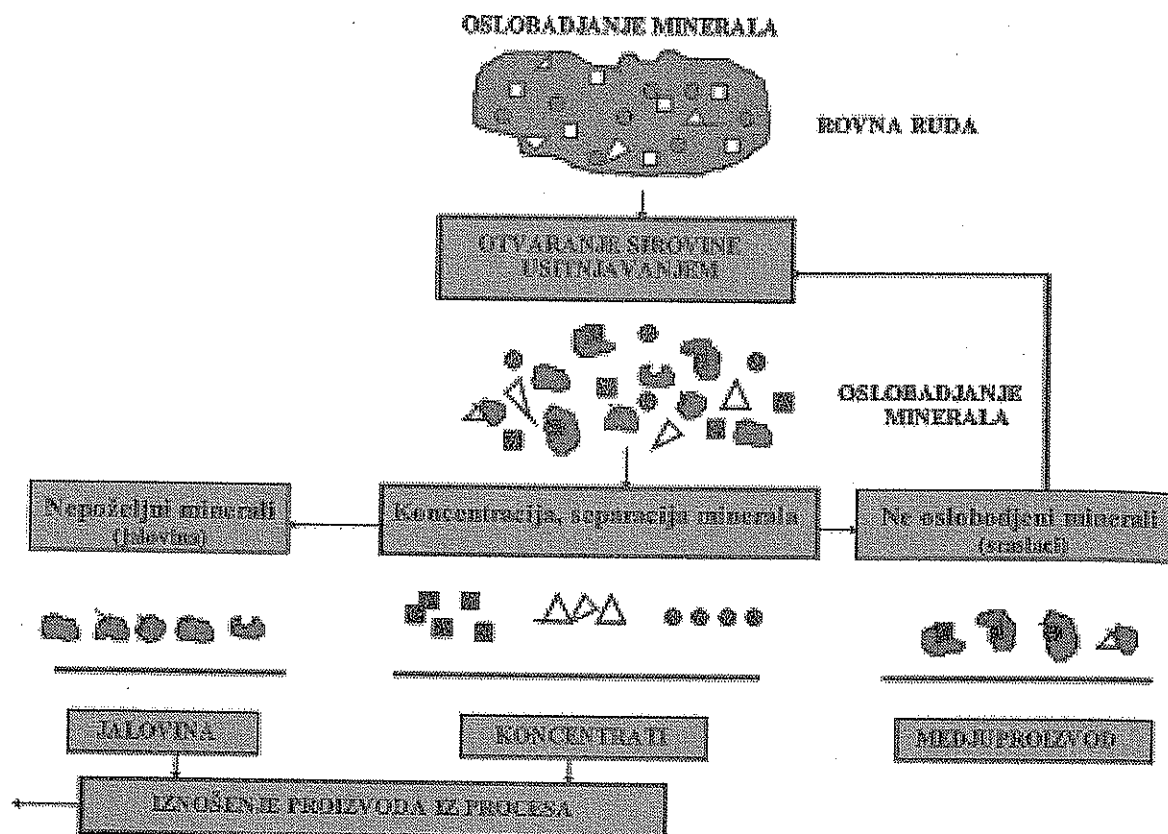
Sl.6.2 Rasponi i optimalne krupnoće zrna sirovine kod različitih postupaka koncentracije



SI.6.3 Ilustracija osnovne šeme procesa pripreme mineralne sirovine



SI.6.4 Ilustracija usitnjene sirovine iz koje su izdvojena: uslovno slobodna zrna korisnog minerala, uslovno slobodna zrna jalovine i srasla zrna medjuproizvoda (donja slika) (po Amstutz-u, 1960.)



Sl.6.5 Ilustracija otvaranja sirovine usitnjavanjem, razdvajanje mineralnih zrna na slobodna zrna korisnog minerala (koncentrat), slobodna zrna nepoželjih minerala (jalovine) i neoslobodena zrna – sraslice (međuproizvod)

□ **Prvi stadijum – otvaranje sirovine, odnosno oslobađanje minerala.** Cilj ove operacije je da oslobodi korisne minerale od pratećih minerala matične stene (jalovine) ili izvrši otvaranje sirovine. Ovo se obično postiže lomljenjem (usitnjavanjem) stenskog materijala na komade koji su manji od samih zrna minerala, odnosno, agregata kristala. U idealnom slučaju, rezultat ove operacije, je smeša zrna minerala gde svako čini samo jedan mineral, jedna mineralna vrsta. Na žalost ovo se retko postiže.

□ **Drugi stadijum - razdvajanje i koncentracija (izdvajanje monomineralnih frakcija).** Oslobođeni minerali iz prvoga stadijuma se razdvajaju u grupe tako da svaka grupa sadrži samo jednu mineralnu vrstu. Ovaj stadijum procesa PMS se postiže koristeći se razlikama bilo fizičkih bilo fizičko-hemijskih ili hemijskih osobenosti (karakteristikama) različitih mineralnih vrsta. Samo izdvajanje nekog minerala u posebnu grupu konačno ima za cilj koncentraciju tog određenog minerala.

□ **Treći stadijum - iznošenje i skladištenje koncentrata i jalovine,** na odgovarajući način, iz postrojenja po završetku procesa. S obzirom da samo izvesna postrojenja funkcionišu savršeno, česta je pojava povratnog ciklusa kojim se ne odgovarajući materijali (međuproizvodi) vraćaju na neki prethodno prikazani stadijum procesa.

6.1.3 STRUKTURNE KARAKTERISTIKE I OSLOBAĐANJE

Pošto je prva faza u valorizaciji mineralnih sirovina usitnjavanje, a čiji je cilj da se oslobode korisni minera-

li, jedni od drugih, ili od pratećih minerala jalovine, poznavanje veličina zrna (agregata kristala) i složenosti međusobnih odnosa prorastanjem je od posebne važnosti i značaja. Samo se sistematskim ispitivanjem sirovine (i proizvoda koncentracije) na poliranim rudnim preparatima mogu dobiti podaci o optimalnoj krupnoći zrna, pri kojoj će se ostvariti efikasno oslobađanje minerala. Nedovoljno usitnjavanje imaće kao rezultat gubitak korisnih minerala u jalovini, dok će se preusitnjavanjem sirovine zalud trošiti energija, odnosno proizvoditi vrlo sitne čestice (mulj) koji neće moći, u postupcima PMS, biti uspešno tretirane. Efikasnost postupaka usitnjavanja koji se određuju u stadijumima ispitivanja, ili pilot postrojenju, mora biti praćena i ispitivanjima rudnim mikroskopom na specijalnim briketiranim preparatima usko klasiranih proizvoda usitnjavanja (pri različitim finoćama mlevenja).

Široki spektar tipova prorastanja koji se javljaju među rudnim i mineralima jalovine kao i između različitih rudnih minerala, koje eventualno treba međusobno odvojiti (frakcionisati, separisati) smo već upoznali tokom identifikacije minerala i određivanja strukturno-teksturnih karakteristika sirovine.

Pri razmatranju pitanja oslobađanja minerala jedna prilično jednostavna klasifikacija, zasnovana na geometrijskoj karakterizaciji površina prorastanja i struktura vezanosti, bez posebnih genetskih implikacija, može biti vrlo korisna. Jednu takvu klasifikaciju struktura rudnih minerala predložio je *Amstutz* (1961.). Sl. 6.6.

Tip 1 a 	Prosta srastanja, sa ravnim ili blago zakrivljenim pljosnima prorastanja . Vrlo učestali tip kod polimineralnih sirovina, sa mnogo primera.
Tip 1 b 	Nepravilan razuđen, ameboidni tip srastanja. Jednostavan i čest tip kod polimineralnih sirovina (i nemetala) sa puno primera.
Tip 1 c 	Složeni, pisano grafički, mirmekitski ili eutektički tip srastanja. Uobičajeni tip: halkopirit–stanin, halkopirit–bornit, marmtit–halkopirit, kvarc–feldspat itd.
Tip 1 d 	Impregnacioni, emulzioni, kapljičasti , tip raspada čvrstih rastvora i druga složena srastanja. Čest tip: halkopirit u sfaleritu, halkopirit u statninu, sericit u feldspatima, tetraedrit u galenitu i drugi.
Tip 2 a 	Korozioni, oksidacioni, rubni, atolasti, prstenasti tip srastanja. Primer ovoga tipa: halkozin i kovelin na piritu, halkozin na halkopiritu i slični primeri oksidacije primarnih sulfida.
Tip 2 b 	Koncentrični, sferični, oolitski, pizolitski i drugi tipovi srastanja. Uobičajeni primer: uranit sa galenitom, ceruzit sa limonitom, halkopirit sa bornitom, manganove i oksidne rude gvožđa i drugi.
Tip 3 a 	Žiličasti, slojeviti, vlaknasti i slični tipovi srastanja. Primeri: molibdenit–pirit, silikati, karbonati, fosfati i drugi.
Tip 3 b 	Linearni, polisintetički, lamelarni tip srastanja. Primeri: pirotin–pentlandit, hlorit–minerali glina, titanomagnetit–ilmenit–rutil–hematit itd.
Tip 3 c 	Mrežasti, parketni i drugi primeri srastanja. Primeri: hematit–ilmenit–magnetit, bornit i kubanit u halkopiritu, milerit i linecit, i druge strukture metala.

Sl.6.6 Dijagram etalonskih tipova srastanja minerala (po Amstutz-u 1960.)

Na dijagramu etalonskih tipova srastanja minerala, koju je predložio *G. C. Amstutz* (1954, 1960.), dati su karakteristični primeri zrna, nastalih lomljenjem sirovina različitih struktura, a razvrstani su u devet tipova i zvanično su u upotrebi Geološke službe SAD od 1960. godine, a kasnije i u drugim zemljama, posebno, engleskog jezičkog područja.

U želji da ideja zaživi i u strukama, kojima je prvenstveno i namenjena, kao što je priprema mineralnih sirovina, *James R. Craig* i *David J. Vaughan* (1981.) u svojoj poznatoj monografiji u delu o "*Geometrijskoj klasifikaciji struktura minerala i ponašanju pri oslobađanju*" daju širi pregled glavnih tipova struktura i načine srastanja. Kompletan pregled *Craig*-ove (1981.) klasifikacije dat je na dijagramu Sl.6.7.

Ova klasifikacija koja pored strukturno-teksturnih karakteristika obuhvata i primere ruda kao i dodatne informacije vezane za osobenosti i mogućnost oslobađanja minerala različitog genetskog tipa, kao i za samu prirodu srastanja.

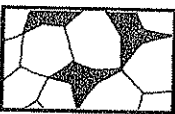
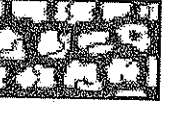
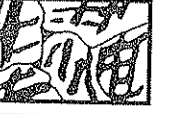
Kod razmatranja srastanja minerala važni su kako tip i veličina dodirnih površina tako i priroda međusobnih graničnih kontakata. Ovo može da ukaže da li će, prilikom usitnjavanja sirovine, doći do lomljenja duž

kontaktne ravni na granici dve mineralne faze, ili će lom nastati na nekom drugom mestu. Za takva razmatranja, kao i informacije o pukotinama, ispucalosti, izraženoj cepljivosti ili o poroznosti materijala su važni podaci koji se dobijaju ispitivanjima pod rudnim mikroskopom. Ovako izučene strukturne karakteristike pored toga što su značajne za postupak usitnjavanja, one su i te kako važne i za same postupke koncentracije (flotacijske postupke, magnetske, gravitacijske, luženje i dr.) tokom industrijskog tretmana sirovine.

Stepen do koga je postignuta oslobođenost datog minerala, pri svakom stadijumu usitnjavanja, može naravno biti kvantifikovan praćenjem pod rudnim ili običnim stereo mikroskopom.



ZNAČAJ KARAKTERIZACIJE STRUKTURA. Potrebu prognoziranja oslobađanja i postupak mikrometrijskih merenja sa načinom predstavljanja rezultata, biće prikazan na primeru ispitivanja mogućnosti koncentracije magnetita iz sirovine novih manjih ležišta gvožđa kod nas. Naime, skarnovska mineralizacija sa magnetitom naknadno je duž pukotina i mikroprslina prožeta kasnijom fazom mineralizacije koja je donela pored pirotina, značajne količine nepoželjnog arsenopirita, interesantnog halkopirita i u neznatnim količinama sulfida olova i cinka. Prema tome suočavamo se sa problemom

Tip strukture	Osobnosti oslobađanja Primeri ruda <i>PRIRODA SRASTANJA I STRUKTURE</i>
1. 	Lako oslobađanje. Česta pojava posebno za magmatske i slabo metamorfisane ili rekristalisane rude. Takođe čest tip ruda koje pokazuju sukcesivnost faza kristalizacije. <i>JEDNOSTAVNO SRASTANJE.</i> Znaste strukture sa definisanim ravnim pljosnima dodira.
2. 	Relativno lako oslobađanje. Česta pojava zaistovremeno iskristalisane minerale ruda gde je slobodna energija veze ista. <i>JEDNOSTAVNO SRASTANJE.</i> Dodirne površine između faza nazubljene sa delimičnim međusobnim prožimanjem.
3. 	Relativno teško oslobađanje. Česta pojava za rude gde je aktivan proces zamenjivanja. <i>RELATIVNO JEDNOSTAVNO SRASTANJE.</i> Vrlo razrušen nepravilan kontakt.
4. 	Kompletna oslobođenost vrlo teška ili nemoguća. Nije poznata kao dominantna struktura u rudama. Nastaje kao produkt izdvajanja i zamene u procesu raspada čvrstih rastvora. Primer za ovaj tip srastanja su galenit/sfalerit. <i>SLOŽENO SRASTANJE SA DUBOKIM MEĐUSOBNIM PROŽIMANJEM.</i> Struktura grafička, mirmekitska.
5. 	Kompletna oslobođenost vrlo teška ili nemoguća. Preporučljiv hidrometalurški tretman (luženje). Uobičajena pojava kod izdvajanja Au-arsenopirit, halkopirit-sfalerit i kod zamene pirit-sfalerit. <i>FINO DISPERGOVANA FAZA.</i> Strukture: uprskana, kapljica, emulziona, eutektična.
6. 	Oslobađanje može biti vrlo teško ako su zrna kontinuirano prekrivena presvlakama. Nije uobičajen tip: često kao reakcioni rubovi (filmovi hematita po zlatu, halkozinske ili kovelinske presvlake po piritu, galenitu ili sfaleritu). <i>TIP INTEGRANULARNOG, CEMENTACIONOG, ATOLASTOG SRASTANJA.</i> Sa odgovarajućim obodnim i strukturama prevlake.
7. 	Oslobađanje prilično teško do teško. Česta pojava ruda Fe, Mn ili Al. Takođe je karakteristika i ruda U (pehblendu) u srastanjima sa sulfidima. Uobičajena je pojava za koloidalne precipitate. <i>TIP KONCENTRIČNOG, SFERIČNOG I KOLOMORFNOG SRASTANJA.</i> Sa odgovarajućim strukturama.
8. 	Oslobađanje je prilično lako do promenljivo. Nastaje u procesima izlučivanja (kubanit-halkopirit, ilmenit-magnetit) ili zamenom kao kod magnetita i hematita. <i>TIP PLANARNOG, LAMELARNOG, TRAKASTOG SRASTANJA.</i> Lamelle mogu biti različitih dimenzija.
9. 	Oslobađanje promenljivo do teško. Pojavljuje se kod sledećih tipova: bornit-halkopirit, anglezit-kovelin-galenit, hematit-ilmenit-magnetit. <i>TIP MREŽASTOG, PARKETNOG, SLOŽENOG PRORASTANJA.</i>

Sl.6.7 Geometrijska klasifikacija struktura rudnih minerala i njihove karakteristike oslobađanja (po James R. Craig i David J. Vaughan, 1981.)

odstranjivanja značajnih količina pratećih sulfida iz ovakvih ruda. Pored ovakve, nepogodne za procese, paragenetske asocijacije minerala, drugi problem sa kojim se srećemo bila su vrlo složena prorastanja i kompleksne strukture. Reč je o sitnoznoj mineralizaciji magnetita u osnovi petrogenih, skarnovskih minerala kasnije prožetih složenim, i takođe sitnozrim prorastanjima žilicastih sulfida.

Za kvantifikaciju različitih vizuelnih informacija (**indeks sraslosti**, osobnost minerala), može se koristiti savremena elektronska mikrosonda sa elektronskim mikroskopom (QEM*SEM analizator slike), ili bolje opremljeni rudni polarizacioni mikroskop sa CCD (RGB) TV-kamerom i programskim paketom analizatora slike.

Za uspešnu koncentraciju korisnih minerala (magnetita, halkopirita) iz ovakve sirovine neophodno je bilo, pre samog usitnjavanja, **utvrditi na matičnoj rudi**, niz karakteristika asocirajućih minerala, vezanih za: krupnoću zrna, krupnoću agregata kristala, oblik, tip srastanja, učestalost i složenost dodirnih površina pojedinih parova minerala i drugih strukturnih osobina, njihovu zastupljenost i drugo.

Za ovakva ispitivanja se može primeniti bilo koji od već gore pomenutih metoda, a u primeru koji je dat koristio se linijski postupak po metodu *Rosinwal-Schand-a* (sa istim uspehom se može koristiti i planimetrijski). Snimanjem linearnih odsečaka - preseka određenih minerala duž gusto postavljenih profilskih linija, dobijeni su sledeći podaci:

- ♦ Suma linearnih odsečaka za dati mineral;
- ♦ Ukupan broj odsečaka (zrna) za dati mineral;
- ♦ Ukupna dužina profilskih linija;
- ♦ Suma kontakata između odabranih parova minerala (veličina dodirnih površina asocijacija minerala).

Informacije o distribuciji linearnih odsečaka, dobijenih neposrednim snimanjima u toku eksperimentalnog rada na dvodimenzionim površinama rudnih preparata, poslužile su za ekvivalentnu stereološku transformaciju u zapreminske vrednosti date sirovine. Tako je moguće izračunati sledeći niz podataka:

- ♦ Zastupljenost identifikovanih minerala - masenu, zapreminsku;
- ♦ Morfologiju zrna, odnosno agregata kristala;
- ♦ Krupnoću tih istih agregata kristala;
- ♦ Specifičnu površinu minerala;
- ♦ Indeks sraslosti (indeks bliskosti) bilo koja dva minerala u paragenezi;
- ♦ Opšte strukturne karakteristike minerala u rudi.

ODREĐIVANJE INDEKSA SRASLOSTI. Da li je dati mineral više ili manje u neposrednom kontaktu sa nekim drugim datim mineralom, nego što bi se očekivalo, ako je razmeštaj minerala slučajan? Da li dati mineral više "voli" neki drugi određeni mineral ili ga nećemo naći u neposrednom kontaktu sa njim? Deo odgovora na ova pitanja, u deskriptivnoj formi, možemo dobiti poznavajući genetske i paragenetske odnose minerala u sirovini, dok numeričke koji su nam daleko značajniji možemo dobiti merenjima.

Za uspešnu koncentraciju korisnih minerala (magnetita i halkopirita u primeru koji se daje) iz date sirovine neophodno je, pre samog usitnjavanja, utvrditi na matičnoj (ne usitnjennoj) rudi, niz karakteristika asocijacija minerala, vezanih za njihovu veličinu - krupnoću agregata kristala, oblik, tip srastanja, učestalost i složenost dodirnih površina pojedinih parova minerala i drugih strukturnih osobina, njihovu zastupljenost i drugo.

Mnogi istraživači zastupaju ideju da se već u početnim stadijumima mineraloških ispitivanja, pored ostalog, daju u stereološkoj analizi i pokazatelji prognoze ponašanja buduće sirovine u pogledu oslobađanja. Kvantifikacija fizičkih i genetskih karakteristika može se sprovesti snimanjem na neporemećenim preseccima specimena, ali isto tako i na fragmentiranim produktima koncentracije. Klasifikacija struktura minerala u pogledu srastanja, predložena je od *G.C. Amstutz-a* (1954.), a usvojena od strane Američkog geološkog instituta 1960., danas se primenjuje u većini zemalja sveta. Pored deskriptivnih svakako da su značajni i numerički pokazatelji tzv. "indeks sraslosti ili indeks blokiranosti", predloženi od *Amstutz-a* i *Giger-a* 1972. Ovaj indeks nema isključivi značaj samo u pripremi mineralnih sirovina on je isto tako interesantan podatak pri rešavanju pitanja geneze minerala. Ovi indeksi aproksimativno odgovaraju pojmu kontiguiteta (dodira, graničenja) predloženog od *Gurland-a* (1958.), a takođe su u vezi indeksa povezanosti predloženog od *De Hoff-a* (1971.). Istu veličinu pod pojmom "indeks bliskosti" ponudio je u svojim izučavanjima oslobađanja i karakterizaciji struktura i *M.P. Jones* (1977.). Pomenute veličine moguće je odrediti snimanjima na mikroskopu pri velikoj gustini profilisanja specimena, dok je precizniji i manje naporniji rad uz pomoć analizatora slike.

Karakterizacija struktura minerala neusitnjene sirovine (matične rude) može se prikazati, pored deskriptivnog, i numeričkim podacima, koji su često mnogo prihvatljiviji inženjerima operativcima. Za prognoziranje oslobađanja minerala na bazi mikroskopskih ispitivanja strukturno-teksturnih osobina sirovine neophodno je: prvo, odrediti način i stepen srastanja minerala; drugo, veoma je značajno, utvrditi parove minerala u neposrednom međusobnom kontaktu - intimno sraslih, nepoželjnih sa korisnim mineralima, posebno ako se u tehnološkom procesu koncentrišu zajedno, i usložnjavaju sam postupak.

Asocijacije odabranih parova minerala, mogu se, prema tome, izraziti preko različitih pokazatelja. *Indeks sraslosti* odabranog minerala, pokazuje deo površine datog zrna koja je u neposrednom kontaktu sa nekim drugim određenim mineralom u odnosu na njegovu ukupnu površinu. Ovaj pokazatelj je interesantan kako za matičnu rudu - ulaznu neusitnjenu sirovinu u proces koncentracije, zbog mogućnosti prognoziranja oslobađanja, a naročito je interesantan pri analizi oslobađanja već usitnjene sirovine kod karakterizacije sraslih zrna.

Indeks, pod nazivom "koordinacioni broj", bio je široko korišćen pri karakterizaciji struktura različitih vrsta stena (*Amstutz, Giger, 1972.*) i njihovoj klasifikaciji. Tako je "koordinacioni broj" između faza A_i i A_k dat izrazom:

$$K_{(A_i, A_k)} = \frac{N_{(A_i, A_k)} \cdot N}{N_{(A_i)} \cdot N_{(A_k)}}$$

gde su:

- $N_{(A_i, A_k)}$ - broj kontakata između A_i i A_k
- N - ukupan broj ispitivanih zrna
- $N_{(A_i)}$ - broj zrna A_i
- $N_{(A_k)}$ - broj zrna A_k

Sraslost minerala A sa mineralom B može se izraziti (*Jones, Barbary, 1975.*) kao:

$$V_{A/B} = S_{A,B} / S_A = S_{V(A,B)} / S_{V(A)}$$

odnosno indeks sraslosti minerala kao:

$$P_{A/B} = S_{A/B} \cdot 100 / S_A$$

gde je:

- $V_{A/B}$ - indeks sraslosti,
- $S_{(A,B)}$ - površina srastanja zrna minerala A i minerala B;
- S_A - ukupna površina minerala A;
- $S_{V(A,B)}$ - specifična površina srastanja (kontakta) minerala A i B (tj. površina kontakta na jedinicu zapremine faze A);
- $S_{V(A)}$ - specifična površina minerala A (tj. odnos ukupne površine zrna prema njegovoj zapremini);
- $P_{A/B}$ - sraslost minerala, (%).

Specifična površina minerala (*Jones, Barbary, 1975.*), kada je određujemo mikroskopski, se izračunava prema obrascu:

$$S_{V(A)} = S_{(A)} / V_{(A)} = 4 / \bar{L}_{(A)}$$

gde je:

- $S_{V(A)}$ - specifična površina minerala A;
- $S_{(A)}$ - ukupna površina minerala A;
- $V_{(A)}$ - zapremina minerala A;
- $\bar{L}_{(A)}$ - srednja dužina preseka zrna minerala A.

Duž serije postavljenih paralelnih profila, po površini rudnog preparata, može se registrovati i broj dodirnih, internih i eksternih, tačaka (može biti registrovana i veličina dodirnih površina). Naime, registruje se broj prelazaka iz faze u fazu, odnosno jednog minerala u drugi mineral u cilju definisanja asocijacije minerala preko dodirnih površina zrna (agregata kristala) minerala u analiziranom materijalu.

Veličine neposrednih dodirnih površina parova minerala ove asocijacije, kao važna strukturna karakteristika, izražena je preko indeksa sraslosti. Statističkom obradom snimljenih podataka (preko gustine dodirnih tačaka), izračunju se vrednosti površine neposrednih kontakata parova minerala u analiziranoj sirovini. Rezultati merenja o učestalosti neposrednih međusobnih dodirnih površina dati su u tablici 6.1.

Rezultati prikazani u tablici 6.1 pokazuju sledeće: da sraslost minerala magnetita sa pirotinom iznosi 4,41 %; da je sraslost magnetita sa halkopiritom 0,61 %; da sraslost magnetita sa arsenopiritom iznosi jedva 0,67%; a da je sraslost magnetita sa jalovinom najveća i iznosi 94,31 %. Na isti način se mogu

Tablica 6.1 Sraslost minerala u analiziranoj rudi

MINERALI	Fe ₃ O ₄	FeS	CuFeS ₂	FeAsS	Jalovina	Σ, %
Fe ₃ O ₄		4.41	0.61	0.67	94.31	100
FeS	16.5		8.21	5.22	70.52	100
CuFeS ₂	18.18	66.67			15.15	100
FeAsS	14.94	32.18			52.88	100
Jalovina	80.92	16.62	0.44	2.02		100

pročitati i drugi međusobni odnosi minerala u rudi. Tako su još vrlo indikativna srasnanja minerala halkopirita sa pirotinom koja iznose 66,67 % (koncentrat pirotina bi prema tome sadržao najveći udeo halkopirita), ili srasnanja arsenopirita sa jalovinom čak do 52,87 %, (što indicira na mogućnost otklanjanja ovog štetnog minerala zajedno sa jalovinom).

Izračunatim indeksima sraslosti može se sagledati ponašanje ove sirovine tokom usitnjavanja i predvideti kako će se pojedini minerali sirovine ponašati tokom oslobađanja i kakve će to posledice ostaviti na kvalitet koncentrata. Tako se na osnovu merenja na rudnim preparatima, utvrđene zastupljenosti pojedinih minerala i njihovih indeksa sraslosti može zaključiti da:

- ♦ nakon smanjivanja krupnoće do određene finoće mlevenja i izdvajanja magnetita, koncentrat magnetita bi od sraslih značajno sadržao sraslice tipa magnetit-jalovina čiji bi se udeo smanjivao sa porastom finoće mlevenja, što takođe važi i za pirotin;

- ♦ da je mnogo manje pojava srasnanja sa arsenopiritom;

- ♦ kao i to da su retka srasnanja sa halkopiritom.

Indeks sraslosti minerala magnetita sa arsenopiritom je veoma nizak, zbog odsustva direktnog kontakta (genetske veze) ova dva minerala. Naknadnim pristizanjem novih količina sulfidnih minerala, sulfidizacijom - arsenopirita i halkopirita, duž pukotina u magnetitu, nije bilo direktnog kontakta ovih sulfida sa magnetitom.

6.1.4 MODELIRANJE MINERALNE SIROVINE

U ovom delu poglavlja je dat hronološki pregled razvoja različitih ideja modeliranja sirovine i karakterizacija strukturnih i drugih osobina minerala. Prikazana je integralnost modela usitnjavanja i modela oslobađanja gde je posebno istaknut značaj oslobađanja minerala i njegov presudni uticaj na rezultate koncentracije, vezan za akutni problem današnjice - štednju deficitarne energije pri mlevenju sirovine. Uspešno modeliranje jedne sirovine omogućuje i veći stepen verovatnoće pri prognozi stepena oslobođenosti i intenzitet njegovog priraštaja, tokom mlevenja, za svaki od konstituenata u sklopu sirovine.

Danas je sasvim jasno, da stručnjacima PMS, kao i svima onima koji su vezani za tehnologiju mineralnih sirovina, mora biti na raspolaganju veliki broj kvantitativnih podataka o mineralima iz sirovina za čiju su tehnologiju vezani i koje opštim imenom zovemo karakterizacija rude (sirovine). Međutim, inženjeri PMS kao i svi oni koji su u neposrednoj vezi sa procesima PMS i valorizacijom minerala, često nemaju kontinuirani priliv kvantitativnih podataka o sirovini počev od početnih istraživanja, preko faze projektovanja postrojenja pa sve do, i u toku, rada postrojenja. Na žalost, mnogi pogonski inženjeri PMS još uvek, a verovatno sticajem okolnosti tehničke opremljenosti, koriste samo hemijsku analizu, pre nego mineralošku i da je to sve od karakterizacije rude, odnosno proizvoda koncentracije. Prošla

su vremena bogatih ležišta, danas kao i u buduće, eksploatacije se siromašne rude, površinskim kopovima ogromnih razmera, gde se ekonomičnost - prvenstveno kroz uštedu energije, materijala i reagenasa - mora sagledavati izuzetnom preciznošću, u relativno kratkom vremenskom intervalu i neprestano.

Razumljivo je što je ranije bilo teško nagovoriti procesnog geologa-mineraloga, da sprovodi *obimna i sporu, a tako jednolična snimanja*, koja bi po završetku posla u najvećem broju slučajeva bila zakasnela (usled promene rude, drugo radilište i slično). Razvoj aplikativne procesne mineralogije sa osnovnim zadatkom karakterizacije minerala iz sirovine, poslednjih decenija se kreće u dva pravca: prvi, u brzou identifikaciji faza; i drugi, u razvoju preciznih mikrometrijskih merenja. Obe ove komponente, od 70-tih godina najčešće nalazimo u međusobnom sadejstvu preko razvijenih sistema analizatora slika. Svemu ovome treba dodati da se upravo na bazi razvijenih sistema analizatora slika, danas već široko razrađuju strukture (hardverske i softverske) **ekspertnih sistema**. Karakterizacija sirovine na osnovu egzaktnih podataka, prikupljenih sistemom analizatora slike, će uz pomoć ekspertnih sistema biti značajno olakšana i što je još bitnije višestruko ubrzana i egzaktnija.



Složeni procesi oslobađanja mineralnih komponentata iz kompleksnih sirovina zahtevaju kao osnovnu naučnu metodu savremene nauke primenu *metoda modeliranja*. Metoda modelovanja ili *modeliranja* se oslanja na klasičan *metod analogije*, odnosno ona ima kao pretpostavku sličnost pojava i predmeta. Prema tome, kompleksni objekat ili sistem kao što je mineralna sirovina, odnosno, ruda mora biti modeliran u jedan idealan, sličan objekat - *model* - sa svim karakteristikama za koje se zna da postoje i prisutne su, a koje dosadašnjim istraživanjima nisu precizno utvrđene.

Da bi se sa uspehom pratilo, prognoziralo i merilo oslobađanje datih minerala neophodno je ustanoviti što realnije modeliranje same mineralne sirovine kao složenog sistema sa najmanje dva ili više konstitutivnih elemenata. Ovakav pristup proističe iz osnovne ideje da se primenjeni metodi modeliranja sistema oslanjaju na klasične metode analogije kao pretpostavke sličnosti sa realnom sirovinom tj. rudom.

Cilj ovakvih istraživanja je uvek - modelirati takav proces oslobađanja, koji će za sirovine različite sadržaja-koncentracije korisnih komponentata pri različitim (promenljivim) finoćama mlevenja, utvrditi zakonitost kretanja *integralnog stepena oslobađanja*. Konačno na osnovu eksperimentalno utvrđene i opisane zakonitosti, moguće je prognoziranje intenziteta oslobađanja odabranog minerala pri kolebanju realnih finoća mlevenja, limitirajući eksperimente snimanja na vrlo uzan raspon krupnoće.

Osnovna je ideja da *ruda, sirovina ima sklop na slučaj razmeštenih minerala-konstituenata sa jasno definisanim međusobnim kontaktima*. Zrna korisnog minerala ne pokazuju, u većini slučajeva, nikakvu urednost sklopa izotropnog siste-

ma, međutim strogo su definisane mineralne vrste - diskretna faza. Može se reći da je sistem definisan za binarni izotropni sklop u kome se svaka od konstituentnih faza u datom trenutku definiše kao ispitivana faza, a sve ostale kao jalovina ili kontinualna faza.

□ Kao prvi model mineralne sirovine poznat, po svom odnosu faza kao "dve šahovske table" predložen od *Gaudin-a* (1939.) imao je vrlo značajno mesto i odigrao je svoju istorijsku ulogu. Bio je postavljen na krajnje jednostavnoj osnovi posebnog struktura faza u sistemu kao i specifičnost lomljenja planarnim planparalelnim ravnima. Kod *Gaudin-ovog* (1939.) modela zrna imaju oblik kocke, po granulometriji spada u monodisperzni sistem, strukture nemaju stohastičkih elemenata kao ni mogućnosti merenja. Međutim, ovaj model i danas čini polaznu osnovu na čijoj se jednostavnosti razrađuju novi pristupi modeliranju sirovine i procesa oslobađanja.

□ Tek trideset godina kasnije *Wiegel* (1964.) i *Wiegel i Li* (1967.) razrađuju *Gaudin-ov* (1939.) model i nude svoj novi, koji je zbog odnosa faza u sistemu dobio naziv "Rubikova kocka". Model je takođe monodisperzni po granulometriji, bez stohastičkih elemenata, ali je mnogo realističniji i pruža vrlo verovatna saznanja o procesu oslobađanja. *Wiegel* (1975, 1976.) dalje razrađuje svoj model dokazujući integralnost modela usitnjavanja i modela oslobađanja. Bazirajući ga na računovim verovatnoće model je našao primenu u ograničenim okvirima za određene mineralne sirovine i ima deterministički prizlaz.

□ *Bodziony* (1965. a, 1965. b) u svojim radovima nije dao određeni model sirovine i oslobađanja, ali se smatra jednim od pionira geometrizacije i karakterizacije struktura složenih sistema kakve su mineralne sirovine i značajno je doprineo razvoju njihovog modeliranja. Strukturne karakteristike njegovog pristupa mogu se primeniti na bilo koji oblik zrna i bilo koju granulometriju zrna, odnosno faza odgovara pravilnom, normalnom rasporedu konstitutivnih elemenata i poseduje stohastičke elemente. Do razrade konkretnog modela zapravo nije ni moglo doći u to vreme, zbog još nedovoljno razrađenog matematičkog aparata u toj oblasti.

□ Radovi *Amstutz-a* i *Giger-a* (1972.) kao i raniji radovi istog autora na polju stereološke karakterizacije struktura, poslužili su *Steiner-u* (1975.) za razradu postupka prognozirivanja identiteta čestica, odnosno njihovog sastava i vrste, u procesu usitnjavanja izučavanih preko odnosa specifičnih slobodnih površina. Model je primenljiv samo za unapred tretiran standardizovan materijal, a po karakteru struktura odgovara bilo kom odnosu faza, nema ograničenja u pogledu oblika i dimenzija zrna i ima stohastičkih elemenata.

□ *Miller i Reid* (1982.) realizuju novi pristup modeliranju oslobađanja preko funkcije specifičnih slobodnih površina i izražavaju ga kao *kumulativni priraštaj oslobađanja* (CLY - Cumulative Liberation Yield). Uvedeni pojam karakterizacije struktura i kvantifikacije oslobađanja ili sraslosti - normalizovana verovatnoća asocijacije minerala, kao mere stepena slučajnosti asocijacije minerala čine suštinu pristupa ovoj problematici.

□ Oslobađanje minerala u funkciji veličine slobodne površine se pominje kod *Steiner-a* (1973), međutim eksplicitni model do ovih radova nije pružen.

□ *Andrews i Mika* (1976) oslobađanje posmatraju kao nerazdvojan proces sa usitnjavanjem i zalažući se za simultanost praćenja ova dva procesa uvode funkciju selekcije i funkciju lomljenja.

□ Široko prihvaćen koncept modeliranja mineralne sirovine i procesa oslobađanja dao je i *King* (1975, 1979, 1982, 1983.). U svojoj karakterizaciji struktura on polazi od bilo kog odnosa minerala u sistemu, polidisperzne granulometrije, bilo kog oblika zrna, sam model dozvoljava stohastičke elemente, a merenja se odnose na utvrđivanje distribucije slučajnih linearnih odsečaka preko praćenih faza. Matematički tretira mere ne odsečke i zastupa ideju o slučajnosti razmeštaja faza i fraktura duž profilne linije snimanja. Pored izvesnih primedbi na model *King-a* (1975.), kao "linijskog udeonog oslobađanja", *Moore* (1983.) nalazi da su odstupanja od realnih vrednosti u

predelu krupnijih klasa, znatnija. Sprovedena testiranja *King-ovog* (1979.) modela od *Coleman-a* (1983.), *Finch-a* i *Petruck-a* (1984.) sa izvesnim dopunama i korekcijama, smatraju da on daje zadovoljavajuće korektne rezultate, uz dodatnu kalibraciju za date uslove.

□ Model *Klimpel-a* i *Austin-a* (1983.) koristi elemente prethodnih modela i praktično se nastavlja na njih, ima koncept jednodimenzionog snimanja i neposredne volumetrijske transformacije merenja, a bazira se na Monte-Carlo simulaciji. Prema karakterizaciji struktura *Klimpel-ov* (1983.) model dozvoljava sve oblike zrna, razmatra više varijanti u odnosu na granulometriju i ima stohastičkih elemenata. Odnos faza ima osnovu u *Wiegel-ovoj* (1964.) varijanti "usamljeno zrno", odnosno varijanti "krajnje neravnomernog razmeštaja" posmatrane faze kod *Gaudin-a* (1939.).

□ Stohastički model *Lin-a* i dr. (1984, 1985, 1987.) nije samo nov kao stohastički model već i fenomenološki. Model omogućuje, generisanje zrna od dva ili više minerala, rojenjem "na slučaj", sa krajnje proizvoljnim oblikom. Modeliranje dozvoljava veliku fleksibilnost generisanja, uz vrlo široku mogućnost kontrole promenljivih. Simulacijom sondažnog profilisanja tako generisanog matematičkog prostora - sraslog zrna, moguće je dobiti čitav niz važnih informacija u pogledu oslobađanja, funkcija transformacija i korektivnih faktora.

□ Značajan doprinos ovoj oblasti daje i *Pamela Devy* (1984.) ponudivši svoj matematički model. Ovaj model karakteriše, po svojim strukturama bilo koji odnos faza u sistemu gde nije uslovljena granulometrija zrna, a ni oblik nema ograničenje, poseduje stohastičkih elemenata. U svom teorijskom radu *P.Devy* (1984.) se oslanja na koncept koji je razradio *Serrin* (1982.). Ovim izučavanjima *P.Devy* (1984.) jedina matematičkim aparatom izvodi i dokazuje čvrstu vezu strukturnih karakteristika i usitnjavanja. Međutim intergranularna lomljenja i predisponirani pravci u realnim uslovima teško mogu biti praćeni i opisivani.

□ Većina do danas ponuđenih modela oslobađanja se međusobno razlikuje - kako po karakterizaciji struktura, karakterizaciji zrna nakon fragmentacije sistema, međutim veći deo njih je ipak kompatibilan (*Tomanec*, 1990.). Primenu određenih, u svetu prihvaćenih metoda utvrđivanja oslobođenosti minerala treba usloviti stepenom tehnološke osvojenosti sirovine, odnosno tipom i vrstom rude.

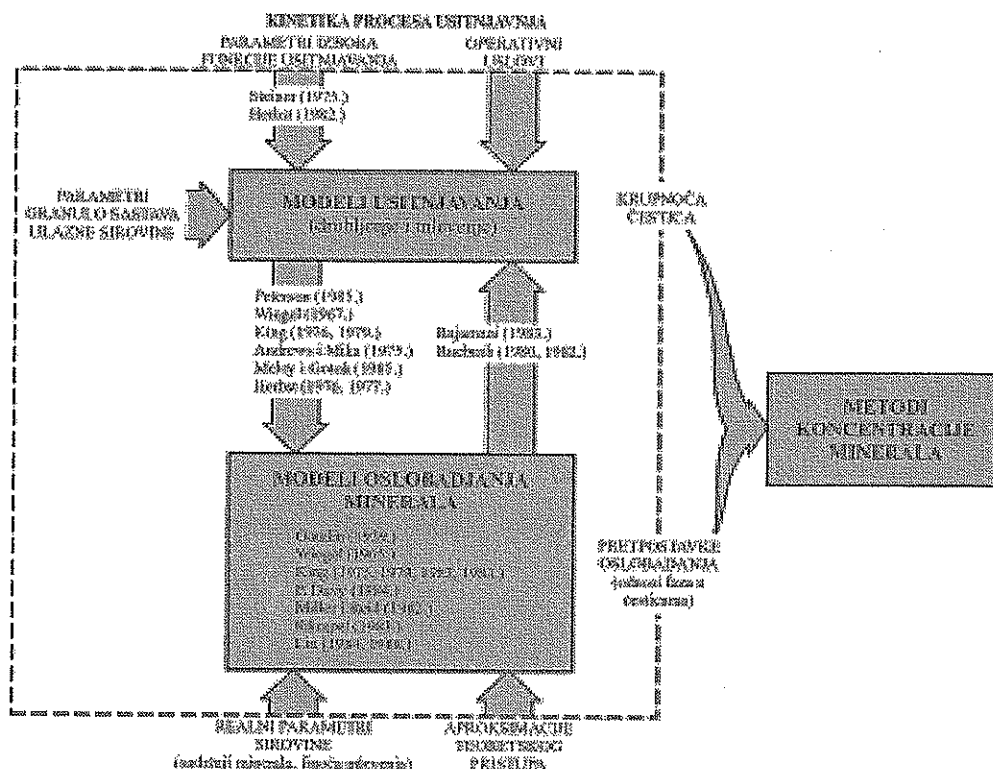
Prema gore prikazanom treba naglasiti da sirovinu treba posmatrati kao složeni sistem čije se ponašanje u procesu otvaranja može utvrditi eksperimentalno, a na osnovu dobijenih podataka se stvara model koji će omogućiti predviđanje ponašanja sirovine u pogledu oslobađanja minerala menjajući finoću mlevenja.

Sva dosadašnja izučavanja treba usmeriti na princip integralnosti procesa usitnjavanja i oslobađanja minerala u cilju prognozirivanja i predviđanja promene identiteta i sastava mineralizovanih čestica (slobodnih i sraslih) u zavisnosti od promene krupnoće ili finoće mlevenja.

Modeliranje mineralne sirovine omogućuje da se sa visokom pouzdanošću može prognozirati krupnoća zrna, odnosno finoća mlevenja pri kojoj se postiže optimalno oslobađanje datog minerala i od presudnog je uticaja ne samo na rezultate nego i izbor metode koncentracije kao i za akutni problem današnjice štednja deficitarne energije pri mlevenju sirovine.

6.1.5 INTEGRALNOST MODELA KINETIKE MLEVENJA I OSLOBAĐANJA MINERALA

Većina procesa fizičke valorizacije minerala se baziraju na konceptu usitnjavanja mineralnih agregata sa ciljem oslobađanja raznorodnih mineralnih vrsta, jednih od drugih, a zatim koristeći razlike u fizičkim osobinama minerala razdvajaju smešu na svoje komponente. Step do kojeg će neki mineral jedne



Sl.6.8 Integralnost modela usitnjavanja i modela oslobađanja minerala (Tomanec, 1989; 1993.)

sirovine biti oslobođen od pratećeg materijala - drugih minerala, je vrlo bitan faktor koji određuje da li jedna shema tehnološkog procesa može biti ekonomično valorizovana. Nije reč o fenomenu skorašnjeg datuma, što se može presuditi iz svake godine sve brojnijih istraživanja u ovoj oblasti, a koja se protežu unazad čak pedeset godina.

Danas poznatiji modeli kinetike mlevenja razrađeni su na bazi izučavanja mlevenja kada je isključivi cilj usitnjavanja - prevođenje materijala u sitnije klase krupnoće. U pripremi mineralnih sirovina pred usitnjavanjem se postavljaju i drugi, složeniji, zahtevi kao što su oslobađanje minerala i odgovarajuća raspodela minerala po uskim klasama krupnoće. Iz tih razloga su se razvila istraživanja radi objedinjavanja modela mlevenja i oslobađanja minerala.

Kinetički modeli mlevenja imaju neposredni značaj kod utvrđivanja parametara mlevenja i igraju značajnu ulogu u izboru optimalne šeme procesa mlevenja i klasiranja, počevši od najjednostavnijih šema mlevenja u otvorenom ciklusu do naj-složenijih šema višestepenog mlevenja i klasiranja.

Do danas su u svetu, učinjeni značajni napor u oblikovanju i konstrukciji teorijskih modela oslobađanja minerala, modela mlevenja i klasiranja sa glavnim ciljem prognozirivanja stepena oslobađanja pri određenoj krupnoći. Tako na bazi oformljenog modela oslobađanja utvrđujemo do koje krupnoće treba izvršiti usitnjavanje da bi se ostvario optimalni stepen oslobođenosti. Svakako da je ogroman podstrek ovome doprinela stalna eskalacija cene energije što je s jedne strane, poslužilo održanju, a s druge strane povećalo interesovanje za fenomen oslobađanja kako u fazi početih projektovanja tako i u procesu tehnološkog tretmana minerala.

Ova oblast istraživanja se vremenom polarizuje - tako imamo s jedne strane grupu istraživača kojoj je cilj karakterizacija osobina mineralnih zrna matične sirovine, sistema, a sa druge strane onu grupu autora čije je težište rada na razvoju i primeni prikladnih modela mlevenja i oslobađanja i svaka od njih nosi karakterističan pečat osobenog i prepoznatljivog pravca istraživanja.

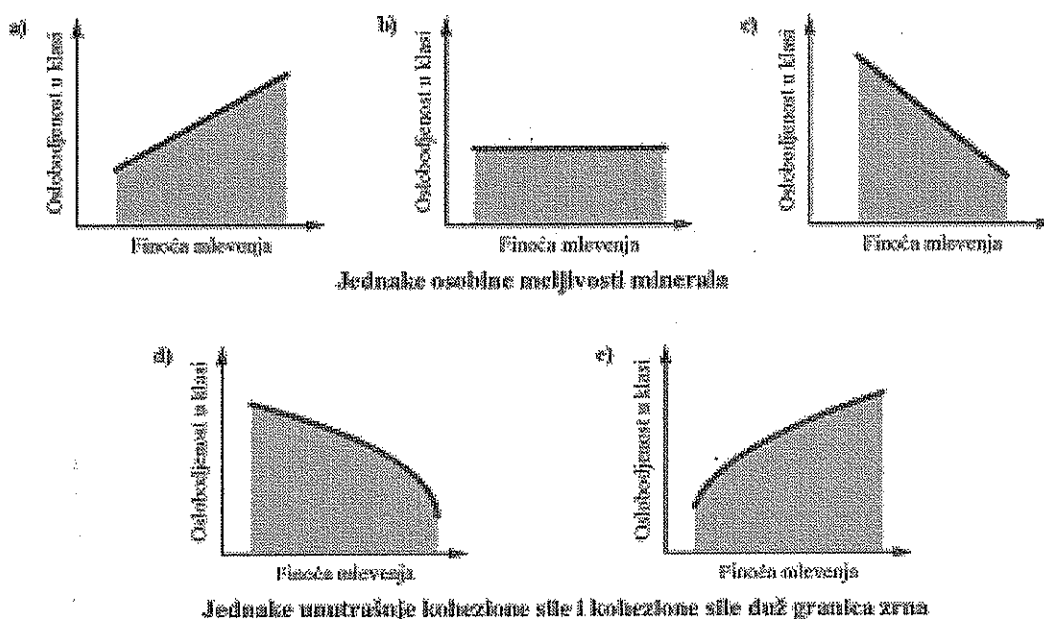
Razlikama u brzini i intenzitetu oslobađanja minerala iz sistema kakav je sirovina, u procesu različitih postupaka smanjivanja krupnoće zrna bavili su se mnogi istraživači. Prikaz

izučavanja u ovom poglavlju su usmerena na princip integralnosti procesa usitnjavanja i modela oslobađanja minerala u cilju prognoziranja i predviđanja promene identiteta i sastava minerlizovanih čestica (slobodnih i sraslih) sa promenom krupnoće ili finoćom mlevenja, a u zavisnosti od sadržaja korisnih minerala. Smisao povezivanja modela mlevenja i oslobađanja minerala, koje se ovde predlaže, zasnovano je na principu integralnosti o spoznajama iz modela sirovine, drugih modela oslobađanja, modela usitnjavanja i njihove međusobne povezanosti. (Sl.6.8)

6.1.6 OSOBINE RELATIVNE MELJIVOSTI MINERALA I FINOĆA MLEVENJA SIROVINE

Usitnjavanjem mineralne sirovine stvara se određena količina slobodnih, odnosno sraslih zrna minerala koji su prisutni u datim klasama krupnoće. Tokom usitnjavanja (mlevenja) sirovine, relativno meki minerali i oni koji se lako usitnjavaju se prvi dezintegrišu. Ne uzimajući u obzir prinos materijala iz krupnijih klasa krupnoće, preusitnjavanje će, u jednoj datoj klasi krupnoće, dovesti do smanjenja udela slobodnih zrna, a prema tome i stepena oslobođenosti tih minerala u krupnijim klasama (Malvik, 1982.) (Sl.6.9). Na slici su ilustrovani osnovni efekti oslobađanja minerala u pojedinačnim klasama krupnoće tokom promene finoće mlevenja u slučaju kada se delovanje kohezivnih sila i meljivost minerala posmatra izolovano.

U sitnijim klasama krupnoće će, analogno prethodnim zaključcima, doći do prinosa (priraštaja) samlevenog materijala iz krupnijih klasa krupnoće. To uključuje obe vrste i slobodna i srasla zrna. Priraštaj slobodnih zrna će usporavati ovaj efekat, naročito kod sitnijih klasa krupnoće. Kod relativno tvrdih minerala efekat je suprotan. Ovde, slobodna zrna u nekoj datoj klasi krupnoće "nastaju" kako od postojećih sraslih zrna, tako i



SL.6.9 Osnovni efekti oslobađanja minerala u pojedinačnim klasama krupnoće tokom promene finoće mlevenja u slučaju kada se delovanje kohezivnih sila i meljivost minerala posmatra izolovano. a) Slabe kohezijske sile duž granica zrna, jaka unutrašnja kohezija; b) Izjednačene kohezijske sile i unutar i duž granica zrna; c) Jake kohezijske sile duž granica zrna i slabe unutrašnje kohezijske sile; d) Minerali koji se relativno lako usitnjavaju (melju); e) Minerali koji se relativno teško usitnjavaju (melju).

prinosom iz krupnijih zrna. U slučaju da sraslo zrno sadrži relativno mek i relativno tvrd mineral, deo relativno mekog zrna će pre biti razdrobljen (okrunjen, odlomljen). U slučaju da je deo mekog minerala u sraslom zrnu prilično mali, ovaj deo zrna tvrdog minerala će ostati u krupnijoj klasi, a oslobodjenost će se u datim klasama krupnoće povećati.

Sirovine različitog sardžaja minerala, što je već poznato za rude različitog genetskog tipa (različitih strukturno-teksturnih karakteristika), različito se ponašaju u procesu mlevenja, što rezultira različitim stepenom oslobađenosti minerala i različitim brzinom oslobađanja. Ova ideja, o razlici u ponašanju minerala (tokom usitnjavanja), odnosno mlevenja, se lako može potvrditi izvođenjem serije opita diskontinualnog mlevenja sa sukcesivnim produžavanjem vremena zadržavanja sirovine u mlinu. Opiti mlevenja vrše se na reprezentativnim uzorcima u laboratorijskom mlinu sa kuglama. Finoća mlevenja se izražava kao maseni udeo klase $-0,074 + 0,000$ mm, odnosno $-0,053 + 0,000$ mm (ili prosej sita 200# odnosno 400#).

6.1.7 MODEL OSLOBAĐANJA

Mnogi minerali se pojavljuju u tvrdim, kompaktnim agregatima i oslobađanje pojedinačnih mineralnih zrna iz tih agregata je tehnički teško i zahteva velike količine energije. U većini slučajeva, oslobađanje se postiže lomljenjem stenskog materijala na manje komade. U drugim slučajevima minerali se nalaze u prirodi kao diskretna, već razdvojena zrna. Tako u peskovima i aluvijalnim ležištima, geološki agensi izvanredno vrše oslobađanje tako da svako zrno (česticu) čini samo jedan mineral.

SL.6.10 a. ilustruje komad stenske mase, sirovine koja se sastoji od dva minerala, A i B. Ako je ovaj komad

bio prelomljen duž jedne ravni, kao što je prikazano na SL.6.10 b, jasno je da iako nastaju dva manja komada, prisutna dva minerala još uvek nisu oslobođena jer novodobijeni fragmenti (komadi) svaki zasebe sadrži oba minerala A i B. Međutim, ako komad na SL.6.10 a, bude predmetom lomljenja duž dve planarne ravni, kao što prikazuje SL.6.10 c, jasno je da nećemo imati samo četiri manja parčeta, već da će dva od njih biti slobodna zrna minerala B, a preostala dva označena sa 1 i 2, koja sadrže i A i B mineral, zahtevaju dalje usitnjavanje (lomljenje) u cilju oslobađanja komponenta A i B. Postoji i specijalan slučaj, prikazan na SL.6.10 d, gde se ravan lomljenja poklapa sa dodirnom ravni minerala A i B. Međutim, ovde nije suština u tome da je oslobađanje izvedeno samo sa jednom ravni preloma već da ni A ni B nisu bili lomljeni u sitnije komade (fragmente) u odnosu na krupnoću pre samog postupka usitnjavanja. Ovakve slučajeve nazivamo **savršenim oslobađanjem**.

Za većinu čvstih mineralnih sirovina savršeno oslobađanje je praktično nemoguće postići i situacije prikazane na SL.6.10 b. i 6.10 c. su one koje se najčešće pojavljuju. Mineraloška ispitivanja neporemećenih stenskih masa (rudnih preparata matične sirovine) određuju distribuciju krupnoće zrna (agregata kristala) korisnih minerala i čine se mnogi napori da bi se postigla oslobodjenost pri krupnoći što bliže moguće stvarnoj krupnoći zrna. Ne samo što se time smanjuju troškovi usitnjavanja sirovine, već i zbog toga što se krupna zrna lakše tretiraju u procesima koncentracije (PMS).

U suštini, nema značajnijeg oslobađanja minerala sve dok krupnoća zrna usitnjene sirovine ne bude jednaka ili manja od krupnoće zrna (agregata kristala) samih minerala. Takođe je jasno da će potpuno oslobađanje biti postignuto jedino kad matična stena (mineralna sirovina) bude usitnjena do vrlo sitnih čestica, a da se pri tome ne vodi računa o daljem usitnjavanju (lomljenju) zrna koja se već pojavljuju kao slobodna.

Lomljenjem već oslobođenih zrna je uzaludno trošenje energije i povećanje troškova procesa. Prema tome, kad god je moguće oslobođeni minerali moraju biti izdvojeni i uklonjeni iz procesa čim su nastali. Ravnoteža treba da se postigne između postizanja maksimalne oslobođenosti, minimalnog usitnjavanja sirovine i minimalnog usitnjavanja već oslobođenih zrna. Ovo je fundamentalni problem PMS zbog vrlo visoke cene usitnjavanja, a dijagram kao onaj na Sl.6.10 pokušava da prikaže pogrešan utisak lakoće sa kojom se oslobođenost može postići. Sledeći zadatak je, prema tome, bio izveden sa namerom da prikaže na jednostavan način poteškoće sa kojima se suočava inženjer PMS pokušavajući da poboljša postupak oslobađanja.

ILUSTRACIJA MODELA OSLOBAĐANJA. U ovom modelu svi dijagrami su u dve dimenzije, premda nas naravno u stvarnosti interesuju trodimenzionalna zrna i čestice. Međutim, dvodimenzionalne slike su mnogo jednostavnije za razumevanje (i crtanje) nego trodimenzionalne slike kao ona na Sl. 6.10 i omogućuju bolje razumevanje koncepta oslobađanja minerala. Sirovina može da se predstavi kao što je prikazano na Sl.6.11 a, gde šrafirana područja predstavljaju korisni mineral, a nešrafirane površine minerale jalovine. Sl. 6.11 b. pokazuje četiri slučajne trase (linije) lomljenja koje mogu istovremeno nastati kad se uzorak lomi, recimo, jednim udarcem čekića. Sl.6.11 c. pokazuje sirovinu sa predisponiranim trasama lomljenja i može se videti da će nakon lomljenja uzorak biti razbijen (podeljen) na jedanaest čestica različite krupnoće, a koji mogu biti razvrstani u tri grupe. Oni označeni sa A predstavljaju slobodna zrna korisnog minerala, ona označena sa B predstavljaju slobodna zrna jalovine dok ona označena sa C predstavljaju srasla zrna (sraslace) koji još uvek sadrže neoslobođenog minerala vezanog sa jalovinom.

Površine ove tri različite grupe zrna mogu se dobiti integriranjem, sabiranjem površina kvadrata, i pokazuju sledeće rezultate:

- ukupna površina primarnog specimena je 2500 mm²;
- ukupna površina minerala u primarnom specimenu je 1250 mm²;
- površina oslobođenog minerala (površine označene sa A) iznosi 80 mm²;
- površina oslobođene jalovine (označene sa B) iznosi 90 mm²;
- površina neoslobođenog materijala - sraslaca (označenih sa C) iznosi 2500-80-90=2330 mm².

Iz ovih podataka možemo izračunati niz pokazatelja. Udeo korisnog minerala u prvobitnom uzorku je $1250/2500 = 0,5$ odnosno 50 %. Udeo tog minerala oslobođenog sa četiri trase lomljenja je $80/1250 = 0,064$ ili svega 6,4%. Udeo slobodne jalovine oslobođene sa četiri trase lomljenja je $90/1250 = 0,072$ ili 7,2 %.

Pretpostavimo, sad da je proizvod lomljenja sirovine na ovaj način, prosejan odnosno klasiran. Primećujemo kako su slobodna zrna korisnog minerala tako i slobodna zrna jalovine skoro jednaka, po krupnoći, odnosno slobodna zrna su mnogo sitnija od sraslih zrna. Uzmimo, da bi stvar uprostili, da se oslobođena zrna odvoje od sraslih zrna prosejavanjem. Udeo potpuno oslobođenog minerala A iznosiće $80/(80+90) = 0,47$ ili 47 %.

Koliki će udeo činiti odgovarajući ne oslobođeni materijal minerala A? Minerala A u sraslim zmima prema tome imamo $(1250-80)/(1250-80)+(1250-90) = 1170/(1170+1160) = 0,50$ ili 50 %.

Sa tog stanovišta je jasno da se usitnjavanjem i klasiranjem neće značajno povećati sadržaj korisnog minerala niti u proizvodu slobodnih niti u proizvodu sraslih zrna. Šta više, sve dok je jedan od proizvoda koncentracije) smeša zrna korisnog minerala i zrna minerala jalovine, a koja nisu zajedno "vezana" na bilo koji način takav proizvod može biti razdvojen na

dve posebne grupe koje sadrže samo mineral A i minerale jalovine, odgovarajuće. Prema tome sledi, da je od prvobitnog uzorka sirovine bilo reducirano u formu oslobođenog samo $(6,4+7,2)=13,6$ % Ovaj model možemo da koristimo za ispitivanje efekata oslobađanja pri različitim krupnoćama zrna, različitog razmeštaja zrna, udela korisnog minerala i različite mreže postavljanja trasa lomljenja (pukotina). Ovo objašnjava Sl.6.12 do Sl.6.21 zajedno sa odgovarajućim podacima datim ispod samih slika. Na svakoj od ovih slika, površine koje predstavljaju korisni mineral (šrafirana polja) čine 50 % od površine uzorka. Postoji pet različitih kombinacija razmeštaja i dva tipa mreže lomljenja korisnog minerala:

- **krupna zrna** pravilnog razmeštaja (Sl.6.12 i Sl.6.13)
- **sitna zrna** pravilnog razmeštaja (Sl.6.14 i Sl.6.15)
- **krupno zрно** (Sl.6.16 i Sl.6.17)
- **sitna zrna sa slučajnim razmeštajem** ali pravilnom orijentacijom (Sl.6.18 i Sl.6.19) i
- **krupna zrna** sa slučajnim razmeštajem (Sl.6.20 i Sl. 6.21).

Za svake od pomenutih parova, postavljana su dva tipa mreže trasa pukotina: pravilna mreža sa serijom međusobno paralelnih i paralelnih spoljnim rubovima zrna minerala (Sl. 6.12, 6.14, 6.16, 6.18 i 6.20), i serijom trasa pukotina sa slučajnim razmeštajem pukotina (Sl.6.13, 6.15, 6.17, 6.19 i 6.21). Položaj slučajno razmeštenih trasa pukotina bio je određen iz tablica slučajnih brojeva. Broj slučajnih trasa pukotina i njihove dužine je isti kao i kod razmeštaja trasa pukotina po pravilnoj mreži.

Razmotrimo sada dobijene rezultate da bismo izveli neke važne zaključke različitih procedura oslobađanja. Oni su postavljeni kao pitanja na koja slede odgovori iz pratećih tablica i odgovarajuće slike.

□ **Prvo pitanje se odnosi na razliku između pravilne i slučajne mreže lomljenja.** Na Sl.6.12 mreža trasa pukotina je tako postavljena da je samo 25 % minerala A oslobođeno. Naravno, nije teško videti da ukoliko bi se vertikalne trase lomljenja pomerile za 1 cm na levo, a horizontalne 1 cm na gore, na prikazanom dijagramu, u tom slučaju bi ležale tačno po ivicama dodira dva mineralna zrna i bila bi postignuta 100% oslobođenost. Mada, čak ni tada ne bi bilo savršene oslobođenosti jer bi prvobitna zrna bila prelomljena na četiri dela (komada).

Na Sl.6.13 na kojoj su trase pukotina postavljene po slučajnoj mreži vidi se da je samo 4 % minerala A oslobođeno, dok je slobodne jalovine 11,5 %. Ova razlika u vrednostima je slučajna (posledica statističke nepreciznosti za vrlo male površine i mali broj linija lomljenja).

Generalno, sa sigurnošću možemo pretpostaviti da će mreža slučajnih trasa pukotina verovatno dati vrednosti oslobađanja znatno manje nego mreža pravilnih pukotina Sl. 6.12.

Kako god, ako je pravilna mreža pukotina krupnija nego krupnoća zrna (agregata kristala) tada se ne postiže oslobađanje, nasuprot slučajne mreže pukotina, koja uvek daje neku oslobođenost, čak i ako je srednja krupnoća čestica mnogo veća od veličine zna (agregata kristala).

U suštini, postupci koji se danas koriste za usitnjavanje tvrdih mineralnih sirovina će pre naginjati na slučajno uređenje, razmeštene, ravni lomljenja nego pravilno postavljene. S druge strane, u mnogim aluvijalnim ležištima, zrna se mogu slobodno držati zajedno (slabo vezana, cementovana) i procedura oslobađanja će se odvijati pre po pravilnoj mreži u smislu da će ravni lomljenja težiti da prate spoljne rubove zrna. Idealno, tada će ravni lomljenja koje blisko prate spoljne rubove zrna biti prihvatljivije jer verovatno daju bolje oslobađanje. Naravno, dodirne ravni između korisnih minerala i minerala jalovine su često oslabljene površine, čak i u relativno tvrdim sirovinama. U stvari ne postoji do sada zadovoljavajućeg načina namernog korišćenja ovih oslabljenih površina u postupku izvođenja intergranularnih lomljenja.

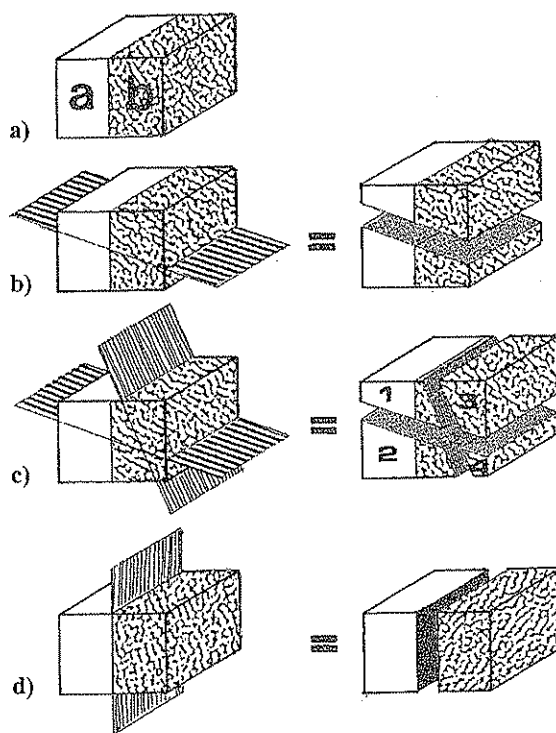
□ **Drugo pitanje može biti - veza između stepena oslobođenosti i krupnoće do koje se sirovina usitnjava.** Uporedimo

slike 6.12, 6.14 i 6.16. Na Sl.6.16 uzorak je usitnjen na komade (fragmente) koji su mnogo manji od veličine (krupnoća) samih mineralnih zrna. Kao rezultat toga, oslobođenost korisnog minerala je veoma dobra, a prema Sl.6.16 ona iznosi skoro 94 %. Ova vrednost će, naravno, postepeno opadati ukoliko bi se mreža trasa lomljenja translatorno pomerila u stranu, pri svim drugim uslovima, ali nikako neće pasti ispod 77%. Prema tome, ova visoka oslobođenost je jedino bila postignuta lomljenjem samog - prvobitnog zrna korisnog minerala, na trideset fragmenata (komada) pa se tako velika količina potrošene energije gubila na usitnjavanje materijala koji je već bio oslobođen.

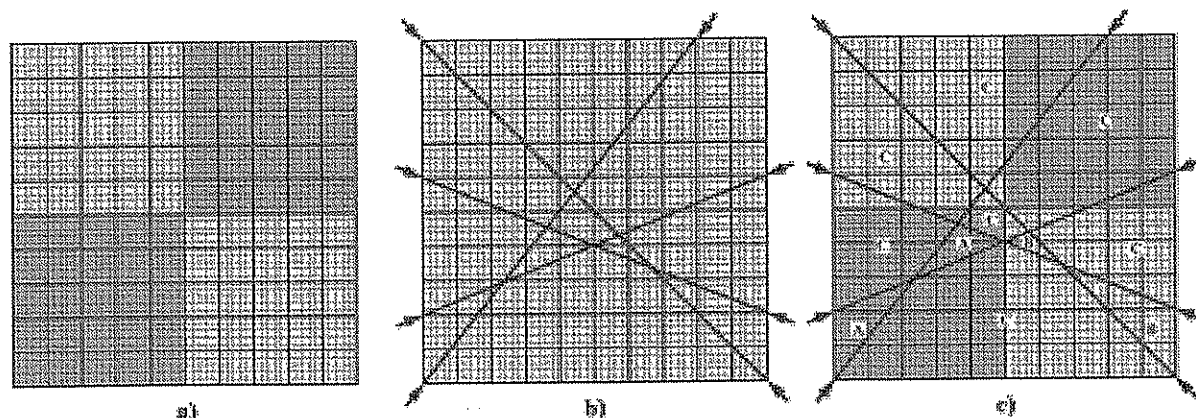
Razmotrimo Sl.6.12 na kojoj je mreža trasa pukotina tokom lomljenja skoro jednaka veličini zrna minerala. Step en oslobođanja je sada mnogo manji, ali su svi lomovi u funkciji postizanja oslobađanja i nema oslobođenih zrna koja bi bila usitnjavana nakon oslobađanja. Mreža trasa pukotina, nakon lomljenja, na Sl.6.14 daje fragmente (komade) iste krupnoće kao što je i krupnoća mineralnih zrna. Osim u veoma specijalnom slučaju kada trase pukotina leže duž rubova zrna minerala, kad ovakva mreža pukotina neće dovesti do oslobađanja niti korisnog minerala niti minerala jalovine. Oslobađanje jedino može biti postignuto superpozicioniranjem sledećih lomljenja, novom, na već postojeću, mrežu pukotina.

Upoređujući rezultate lomljenja - mrežom na slučaj razmeštenih pukotina, sa Sl.6.13, 6.15 i 6.17, zaključujemo da oni pokazuju istu vrstu efekata kao i oni sa regularnom (pravilnom) mrežom trasa lomljenja. ♦ Prema tome, sirovina mora biti usitnjena na fragmente (komade) koji su znatno sitniji od krupnoće samih zrna minerala (agregata kristala) da bi se moglo očekivati bilo kakvo značajnije oslobađanje. Iz tih razloga, važno je unapred znati krupnoću zrna minerala (veličinu agregata kristala) koji se ispituju u sirovini, da bi se odredila krupnoća (sada već finoća mlevenja) do koje sirovina mora biti usitnjena (odnosno samlevena).

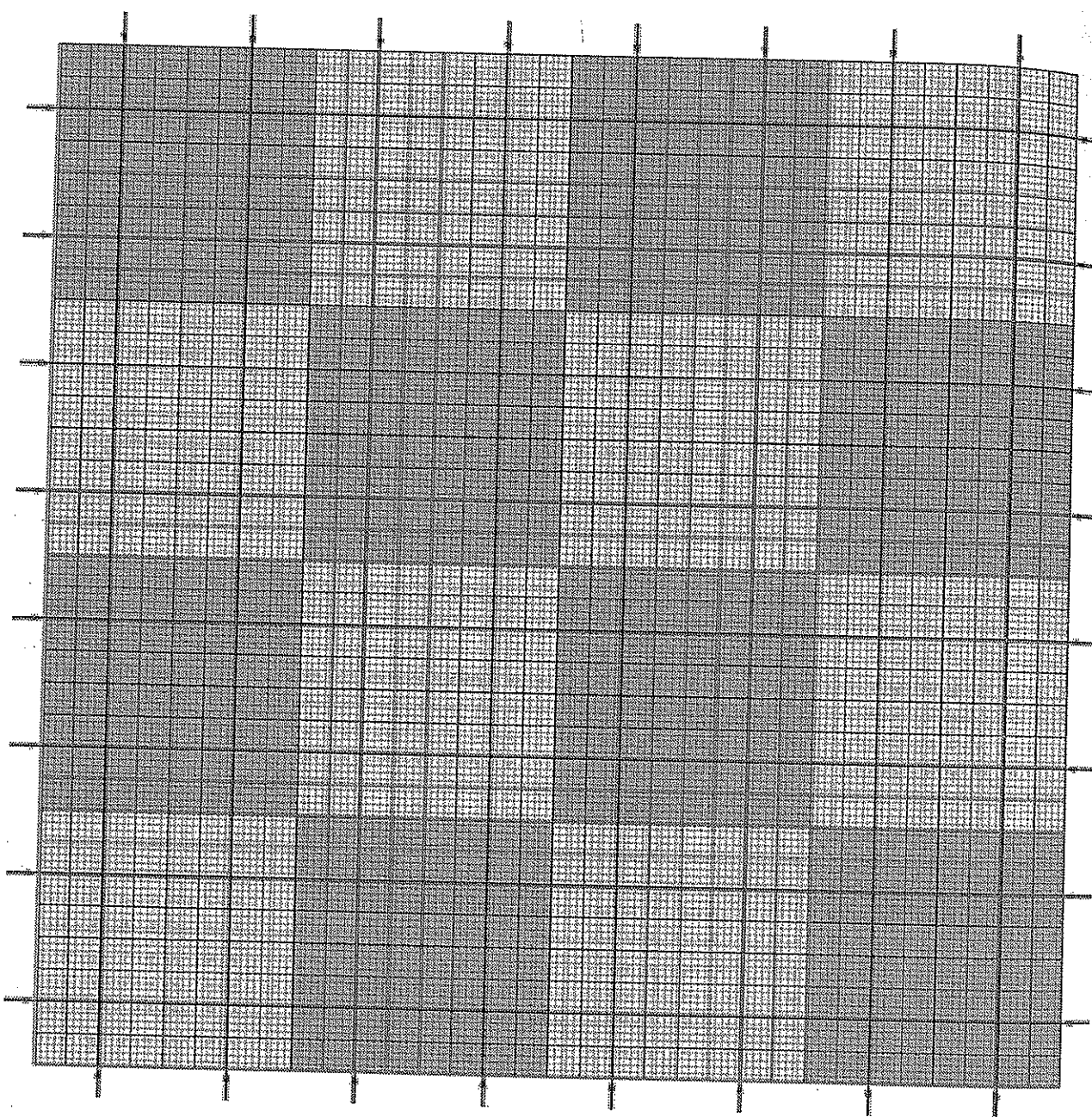
□ Treće pitanje glasi - ima li razlike u tome da zrna minerala imaju pravilan ili slučajan razmeštaj u sirovini? Upoređivanje Sl.6.12 i 6.20, pokazaće da se sa pravilnom mrežom trasa lomljenja, kod slučajnog razmeštaja zrna minerala pospešuje, odnosno postiže bolje oslobađanje. Ako, međutim, uporedimo situacije na Sl.6.13 i 6.20, oslobađanje na Sl.6.13 će se kretati između 3 % i 12 % a sa Sl.6.21, oslobađanje bilo korisnog minerala ili minerala jalovine je približno 9 % pa prema tome ♦ efekat slučajnog razmeštaja zrna minerala neće biti od nekog posebnog značaja.



Sl.6.10 Model oslobađanja minerala rasparčavanjem (komadanjem) - usitnjavanjem, stenskog materijala

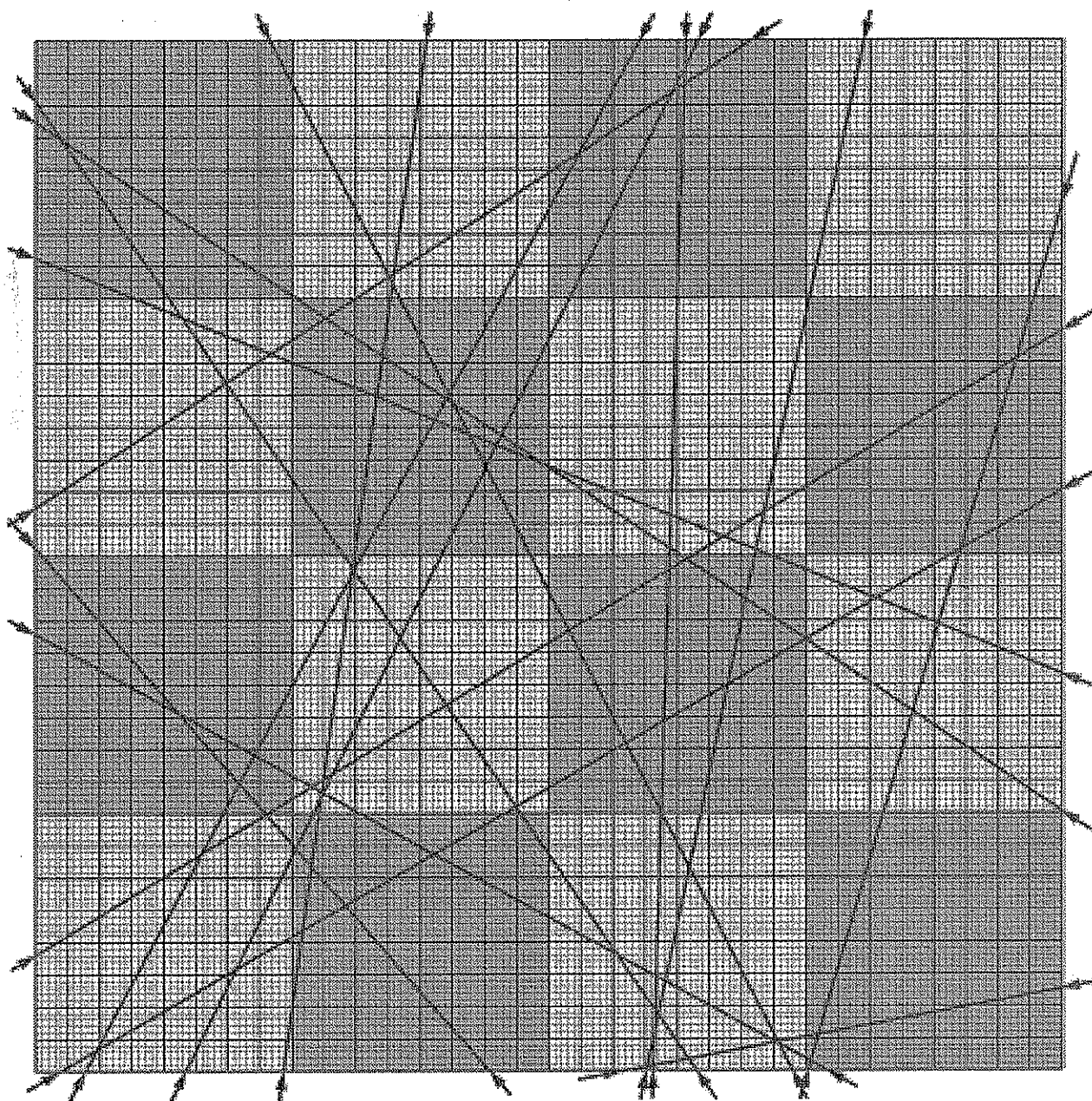


Sl.6.11 Ilustracija modela oslobađanja koji se postiže mrežom slučajnih ravni lomljenja



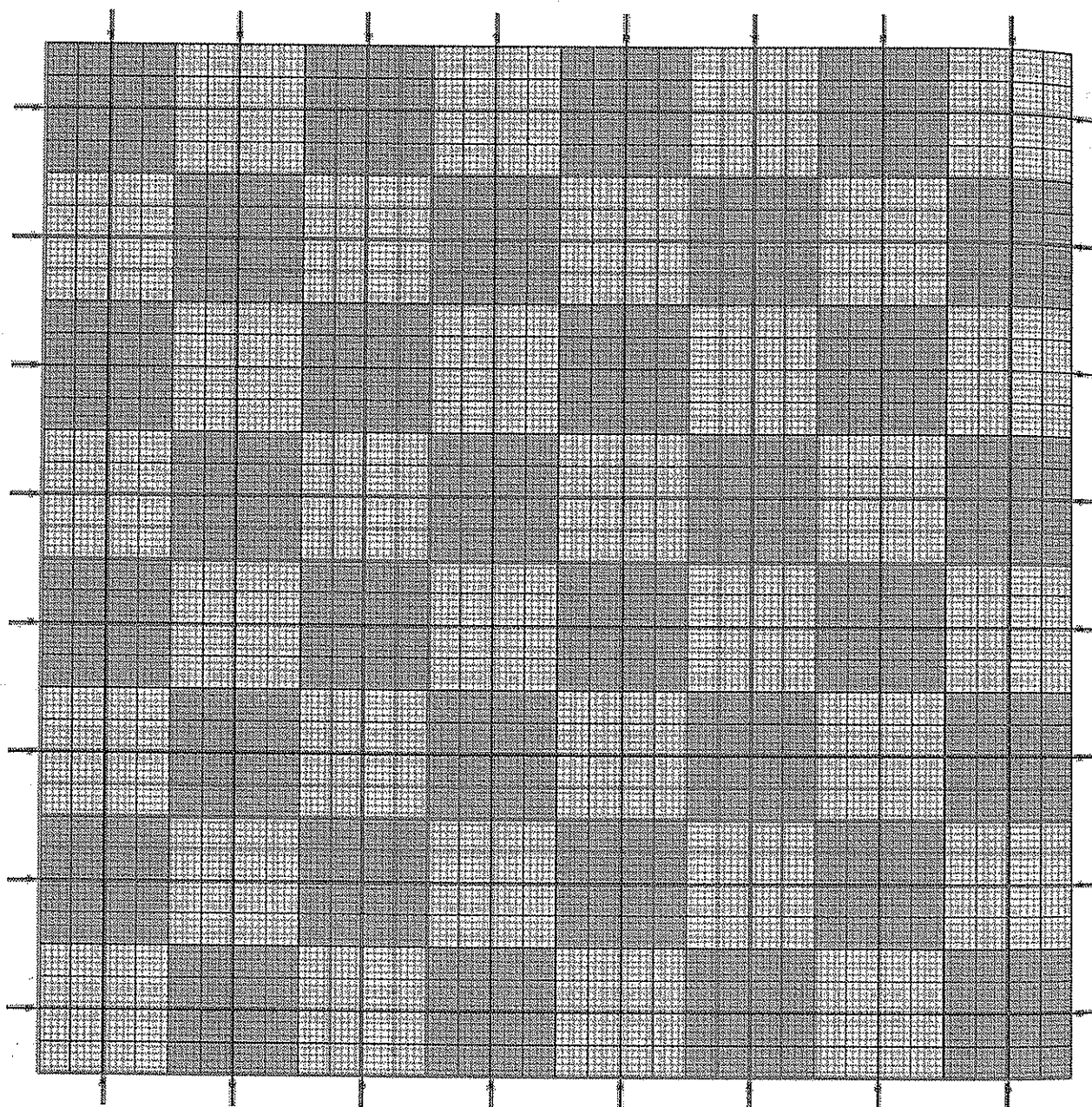
Ukupna površina uzorka	25 600 mm ²
Ukupna površina minerala	12 800 mm ²
Površina oslobođenog minerala	3200 mm ²
Površina oslobođene jalovine	3200 mm ²
Procenat oslobođenog minerala	25 %
Procenat oslobođene jalovine	25 %

Sl.6.12 Simetričan raspored pravaca (ravni) lomljenja preko pravilnog razmeštaja mineralnih faza u sirovini. Dimenzije mreže fraktura su manje od krupnoće agregata kristala.



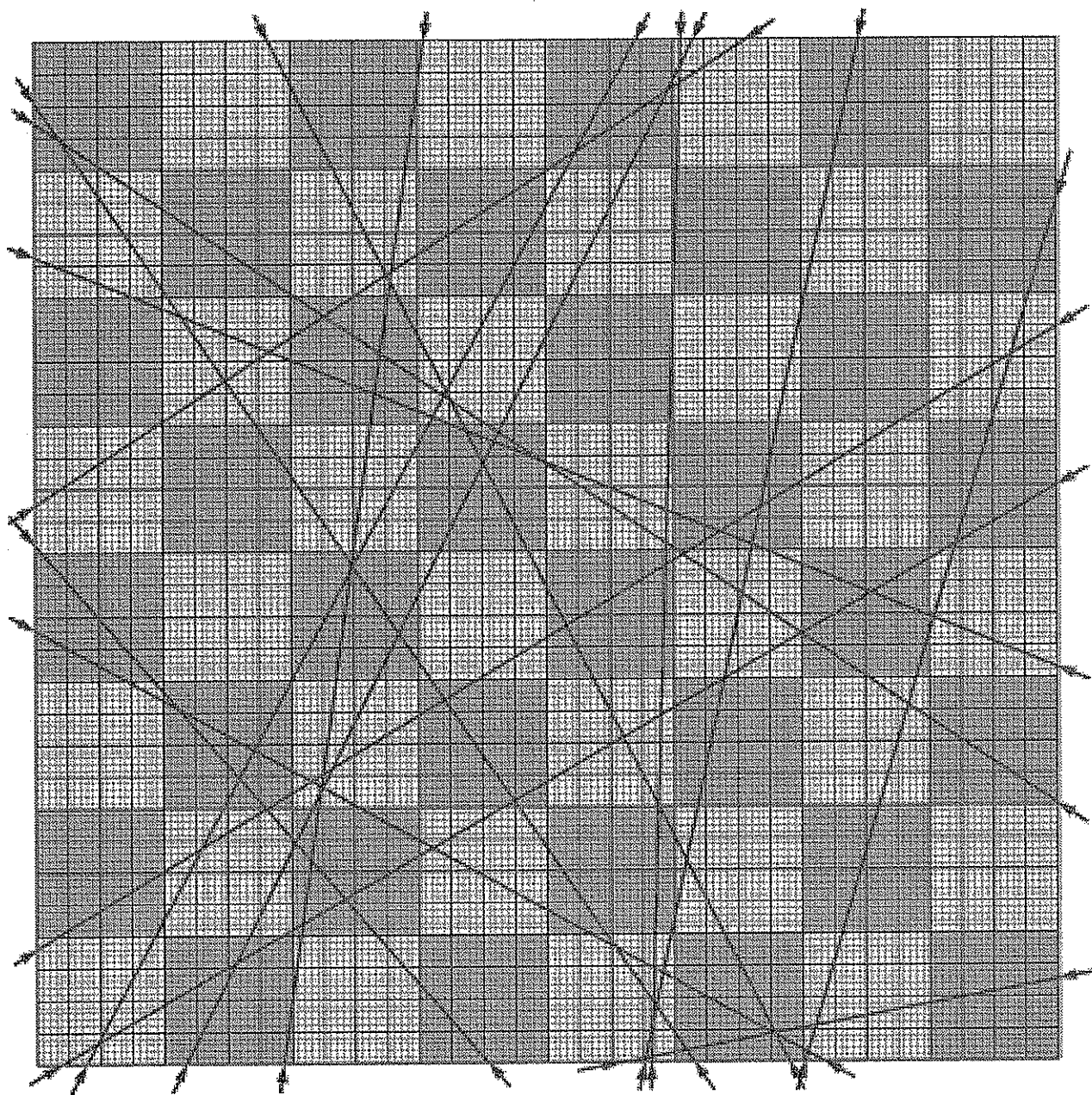
Ukupna površina uzorka	25 600 mm ²
Ukupna površina minerala	12 800 mm ²
Površina oslobođenog minerala	520 mm ²
Površina oslobođene jalovine	1476 mm ²
Procenat oslobođenog minerala	4,1%
Procenat oslobođene jalovine	11,5%

Sl.6.13 Na slučaj razmešteni pravci lomljenja preko pravilnog rasporeda mineralnih faza u sirovini.



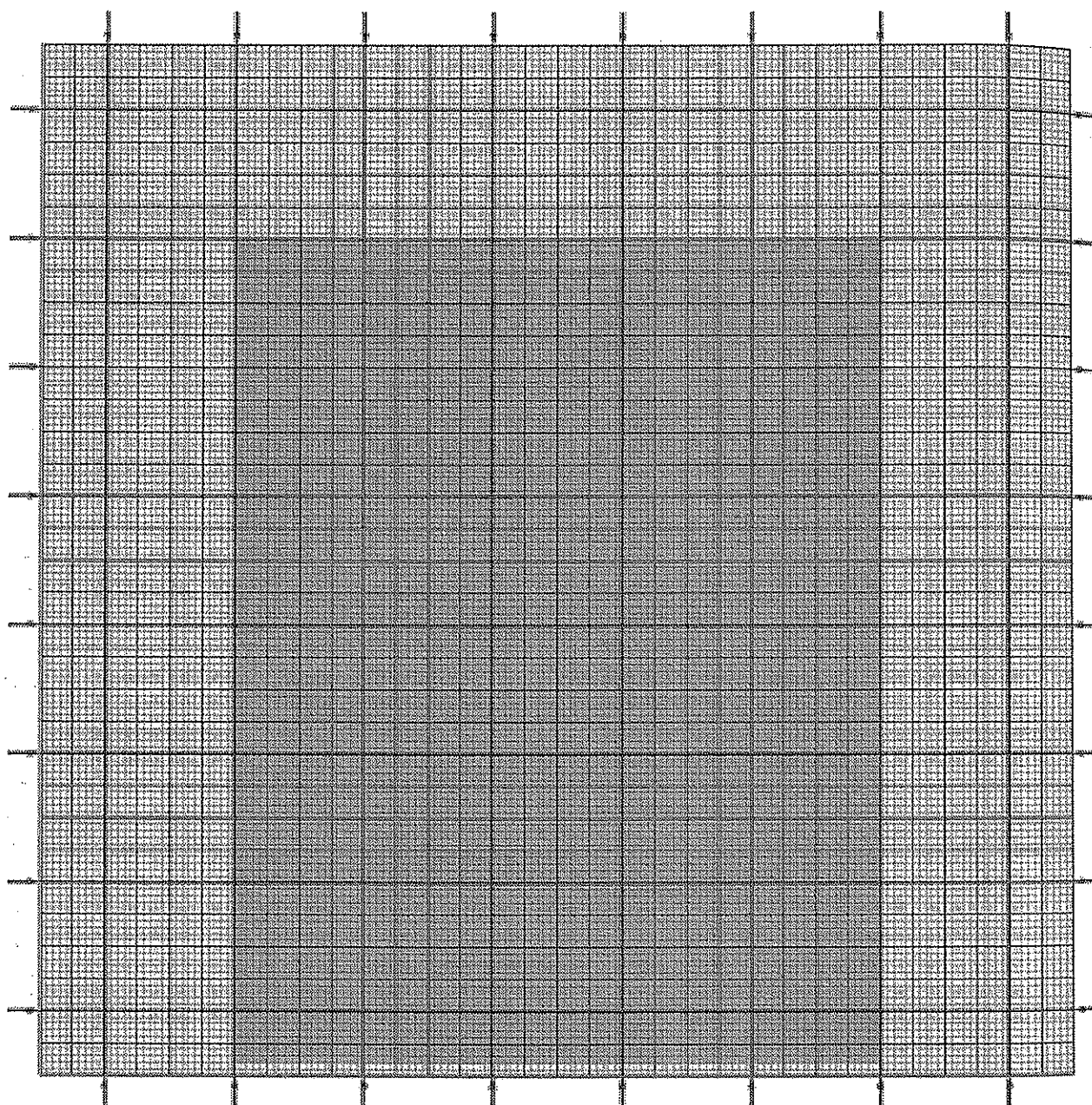
Ukupna površina uzorka	25 600 mm ²
Ukupna površina minerala	12 800 mm ²
Površina oslobođenog minerala	0 mm ²
Površina oslobođene jalovine	0 mm ²
Procenat oslobođenog minerala	0 %
Procenat oslobođene jalovine	0 %

Sl.6.14 Simetričan raspored pravaca (ravni) lomljenja preko pravilnog razmeštaja mineralnih faza u sirovini. Dimenzije mreže fraktura su identične krupnoći agregata kristala.



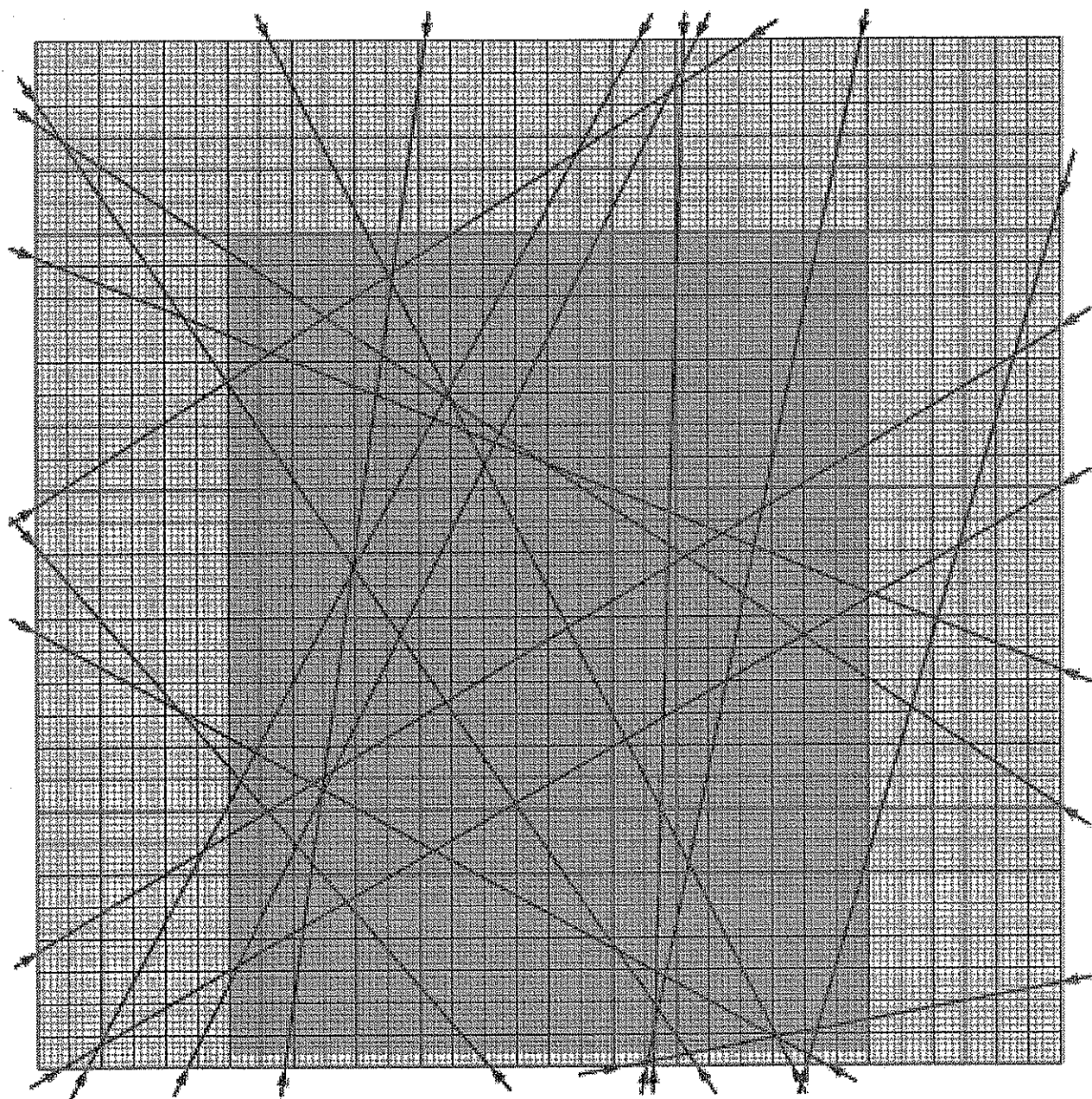
Ukupna površina uzorka	25 600 mm ²
Ukupna površina minerala	12 800 mm ²
Površina oslobođenog minerala	85 mm ²
Površina oslobođene jalovine	272 mm ²
Procenat oslobođenog minerala	0,7%
Procenat oslobođene jalovine	2,1%

Sl.6.15 Na slučaj razmešteni pravci lomljenja preko pravilnog rasporeda sitnoznih mineralnih faza u sirovini.



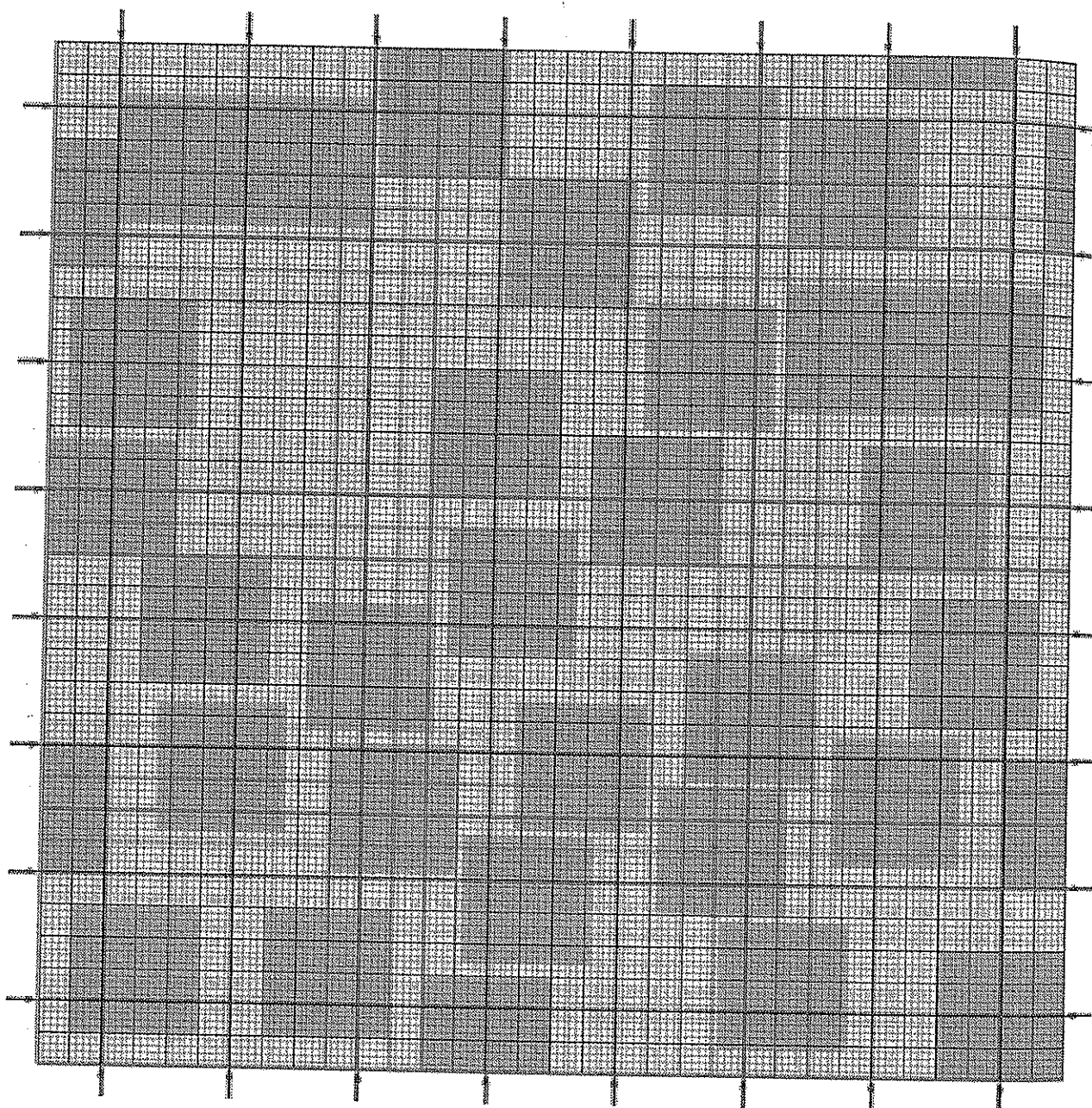
Ukupna površina uzorka	25 600 mm ²
Ukupna površina minerala	12 800 mm ²
Površina oslobođenog minerala	12000 mm ²
Površina oslobođene jalovine	12600 mm ²
Procenat oslobođenog minerala	93,8 %
Procenat oslobođene jalovine	98,4 %

Sl.6.16 Simetričan raspored pravaca (ravni) lomljenja preko samo jednog krupnog agregata kristala u sirovini.



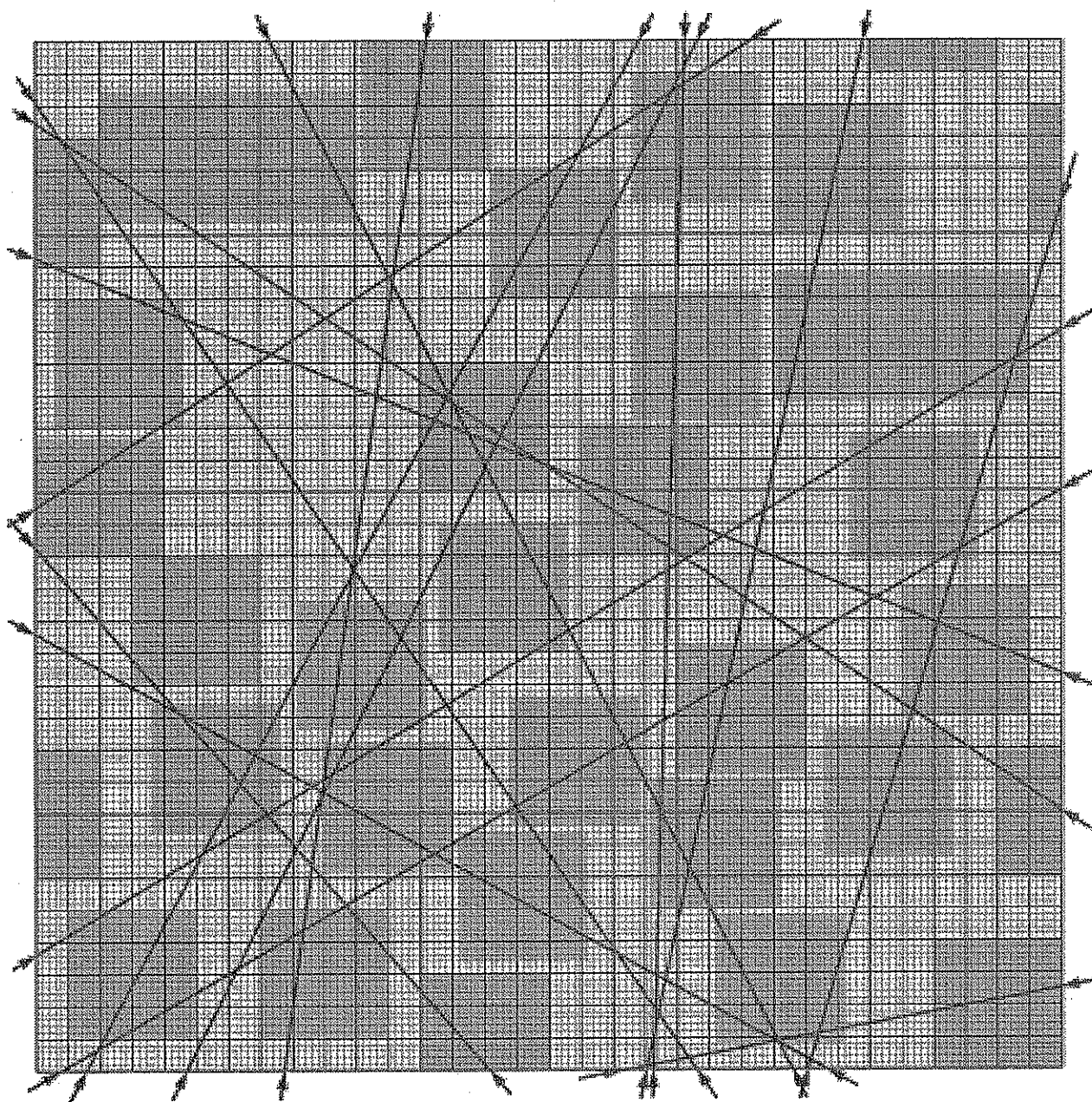
Ukupna površina uzorka	25 600 mm ²
Ukupna površina minerala	12 800 mm ²
Površina oslobođenog minerala	5623 mm ²
Površina oslobođene jalovine	3709 mm ²
<u>Procenat oslobođenog minerala</u>	<u>43,9 %</u>
Procenat oslobođene jalovine	29,0 %

Sl.6.17 Na slučaj razmešteni pravci lomljenja preko jednog krunog zrna mineralne faze u sirovini.



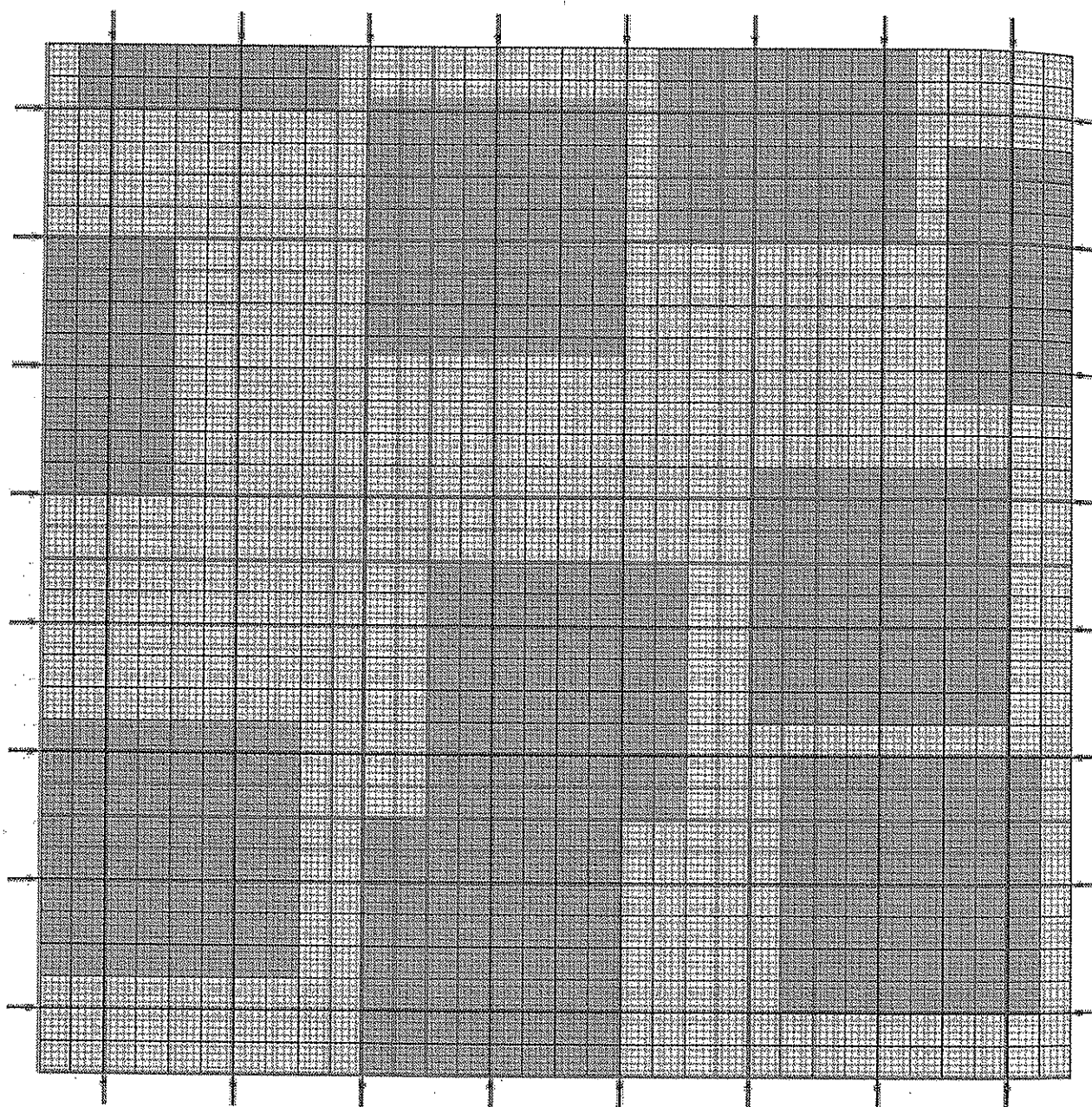
Ukupna površina uzorka	25 600 mm ²
Ukupna površina minerala	12 800 mm ²
Površina oslobođenog minerala	500 mm ²
Površina oslobođene jalovine	2000 mm ²
Procenat oslobođenog minerala	3,9 %
Procenat oslobođene jalovine	15,6 %

Sl.6.18 Simetričan raspored pravaca (ravni) lomljenja preko nepravilnog razmeštaja mineralnih faza u sirovini. Dimenzije mreže fraktura su identične krupnoći agregata kristala.



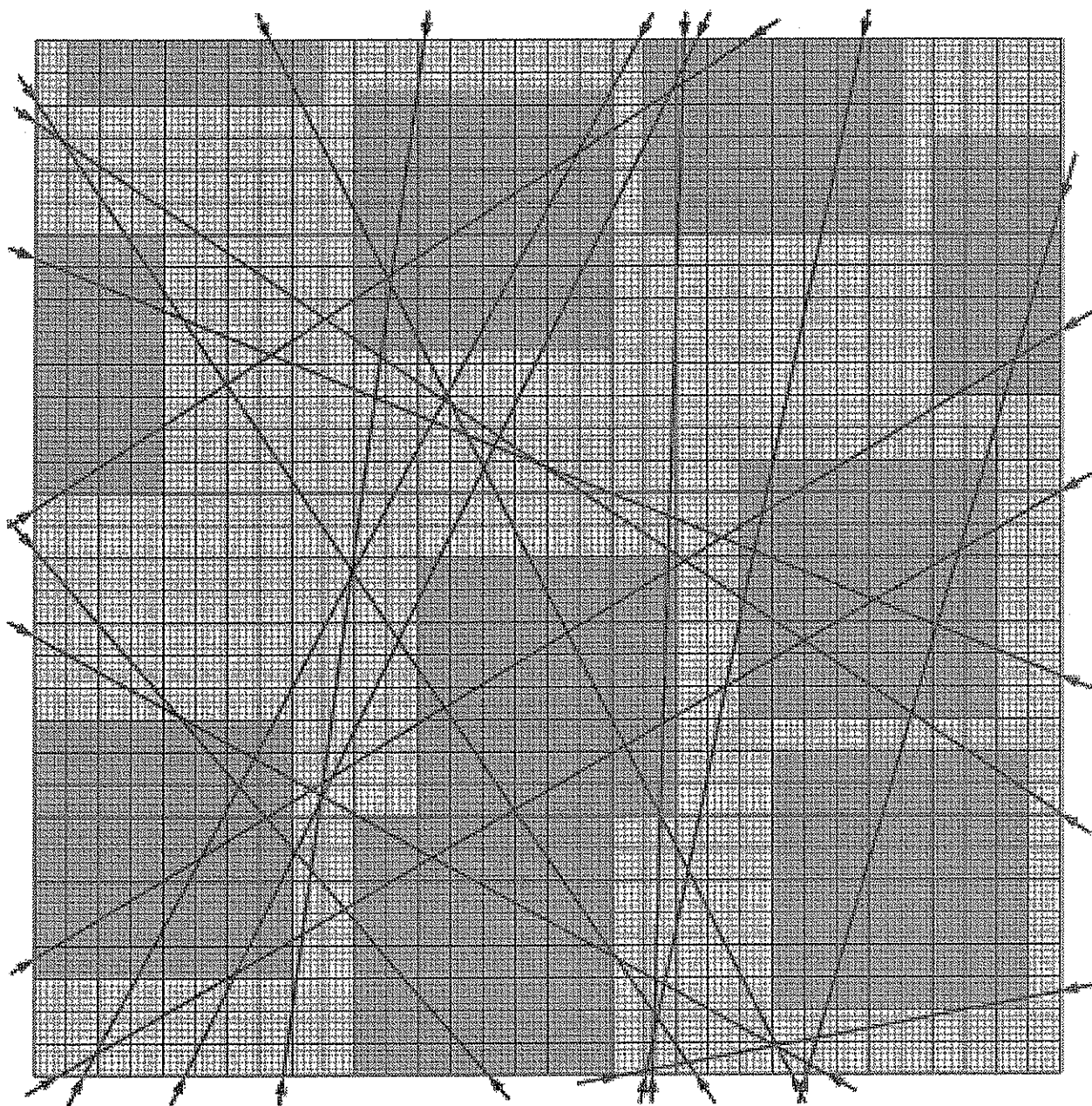
Ukupna površina uzorka	25 600 mm ²
Ukupna površina minerala	12 800 mm ²
Površina oslobođenog minerala	36 mm ²
Površina oslobođene jalovine	790 mm ²
Procenat oslobođenog minerala	0,3 %
Procenat oslobođene jalovine	6,1 %

Sl.6.19 Na slučaj razmešteni pravci lomljenja preko nepravilnog rasporeda sitnozrnih mineralnih faza u sirovini.



Ukupna površina uzorka	25 600 mm ²
Ukupna površina minerala	12 800 mm ²
Površina oslobođenog minerala	6400 mm ²
Površina oslobođene jalovine	6900 mm ²
Procenat oslobođenog minerala	50 %
Procenat oslobođene jalovine	54 %

Sl.6.20 Simetričan raspored pravaca (ravni) lomljenja preko nepravilnog razmeštaja mineralnih faza u sirovini. Dimenzije mreže fraktura su mnogo manje od krupnoće agregata kristala.



Ukupna površina uzorka	25 600 mm ²
Ukupna površina minerala	12 800 mm ²
Površina oslobođenog minerala	1150 mm ²
Površina oslobođene jalovine	1130 mm ²
Procenat oslobođenog minerala	9,0 %
Procenat oslobođene jalovine	8,8 %

6.1.8 ZNAČAJ IZBORA POSTUPKA OSLOBAĐANJA

Oslobađanje minerala se postiže smanjivanjem krupnoće zrna (usitnjavanjem sirovine), sve dok zrna (agregati kristala) željenog minerala ne postanu slobodna i odvojena od pratećih minerala - matriksa. Uopšte, značajnije oslobađanje će početi tek onda kad krupnoća zrna bude istog ili nižeg reda veličine, od srednje krupnoće zrna (agregata kristala) u rudi.

Smanjivanje krupnoće zrna sirovine nazivamo usitnjavanjem (drobljenje i mlevenje). To je postupak koji zahteva velike količine energije i prema tome treba ga izvesti tako da se postignu sledeća dva cilja:

- ♦ da se ne izvrši veće usitnjavanje čestica nego što je potrebno da bi se postigao željeni stepen oslobođenosti;
- ♦ da se obezbedi da već oslobođeni materijal ne bude i dalje usitnjavan, tj. da se oslobođeni minerali što pre uklone iz procesa daljeg usitnjavanja.

Kao posledica zahteva po prvoj tački, postavlja se pitanje: *da li su zrna željenog minerala oslobođena?* Ukoliko je odgovor potvrđan dalje usitnjavanje nije potrebno izvoditi. A ukoliko je odgovor određen, potrebno je dalje smanjivanje krupnoće usitnjavanjem. Kao posledica postavljenog zadatka druge tačke, materijal se propušta kroz uređaj za usitnjavanje, a zatim se izvrši kontrolno prosejavanje ili neko drugo klasiranje i nadrešetni proizvod vrati na dodatno usitnjavanje, a podrešetni ide u dalji tretman. Sl.6.22. pokazuje tok izbora postupka oslobađanja. Tu je za primer odabrano razmatranje smanjivanja krupnoće gde je stepen usitnjavanja uzet sa faktorom 10 za razliku u praksi će kod usitnjavanja biti odabran neki faktor nižeg reda.

Treba imati na umu, da za vrlo sitne čestice sirovine (pri visokoj finoći mlevenja) postoje više načina koncentracije i prema tome donja granica veličine čestica je određena primenjivanim postupcima koncentracije.

Ukoliko su čestice sirovine toliko sitne da se mogu primeniti samo hemijski postupci (luženje) u tom slučaju potpuno, fizičko oslobađanje zrna minerala više nije

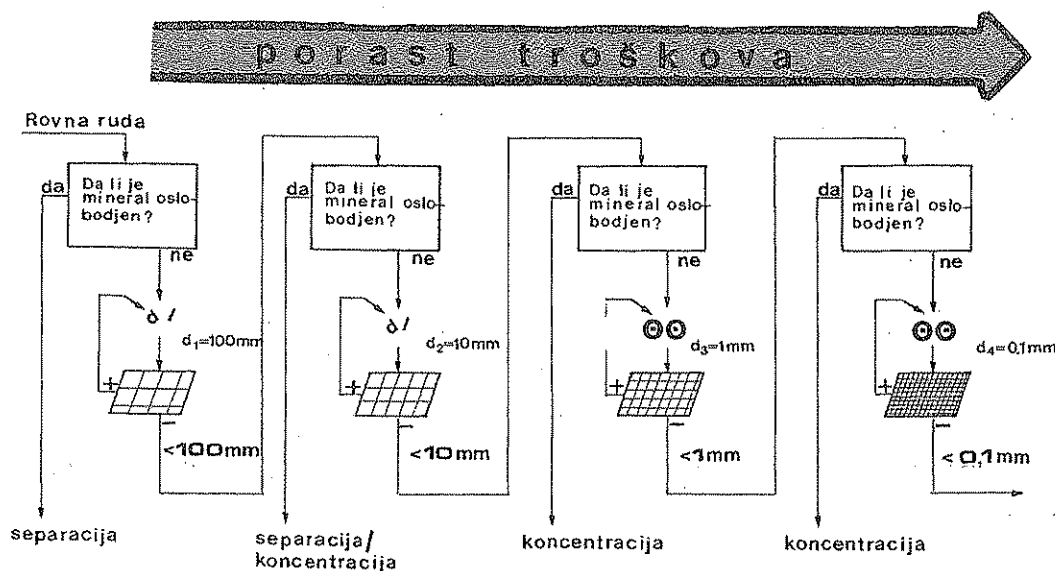
od suštinskog značaja. Prema tome, usitnjavanje ispod nekih 50 μm ređe se izvodi. U svakom slučaju, cena usitnjavanja ispod te krupnoće je u stvari preterano visoka.

❖ ❖ ❖

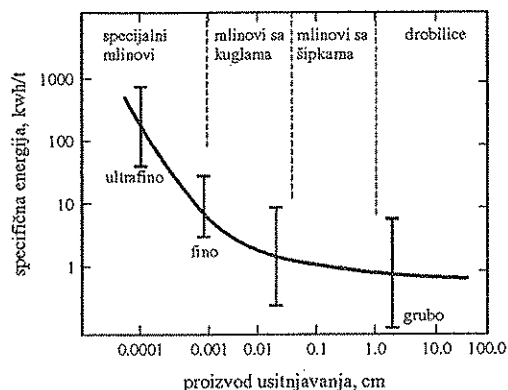
Većina industrijskih postrojenja za PMS uglavnom koristi električnu energiju. Procesi su u osnovi, praktično svi fizički i obuhvataju drobljenje i mlevenje, kondicioniranje površina minerala, fizičko razdvajanje minerala (koncentraciju) i procese odvodnjavanja, kao što su zgušnjavanje, filtriranje i sušenje. Prema *Cohen-u* (1983.), ukupna potrošnja energije se kreće u rasponu 10 do 25 kWh/t, grubo procenjena prema sledećim podacima: drobljenje 0,2-1,0 kWh/t, mlevenje 2,5-8,5 kWh/t, koncentracija 1,0-2,5 kWh/t i pumpe kod transporta 0,5-1,0 kWh/t. Računa se da za drobljenje i mlevenje obično ide više od 30 do 50 % od ukupno potrošene energije u procesu koncentracije, međutim, može da dostigne i do 70 % za tvrde i/ili vrlo sitno impregnirane rude sa složenim prorastanjima. Samo drobljenje je, u stvari, u energetskom smislu jeftino dok je faza mlevenja ta koja zahteva najveću potrošnju energije u industrijskim procesima, a opet daje najmanje efekte.

Lowrison (1974.) je pokazao da samo oko 0,6 % električne energije potrošene u mlinovima sa šipkama i mlinovima sa kuglama u stvari odlazi na stvaranje novih slobodnih površina minerala, tokom njihovog usitnjavanja i prema tome tu je mesto gde treba tražiti rešenja za značajna poboljšanja efikasnosti usitnjavanja. Potrebna za tehnološkim poboljšanjima i usavršavanjima postaju sve kritičnija.

I dok se tehnologije PMS stalno poboljšavaju, a kvalitetna ležišta sa bogatim rudnim telima su već iscrpljena, a sadržaj minerala u stalnom opadanju, istovremeno kompleksnost sirovine je sve veća u smislu izuzetno sitnih impregnacija minerala sa vrlo složenim prorastanjima. Sve ovo ima za posledicu "nikad finijeg mlevenja" da bi se korisni minerali oslobodili. Kao što i Sl.6.23 pokazuje (*Kaplan*, 1987.) energija usitnjavanja dramatično raste čim zahtevana finoća mlevenja za potrebno oslobađanje, pada ispod oko 100 μm .



Sl.6.22 Ilustracija izbora postupka usitnjavanja sirovine i oslobađanje minerala u odnosu na porast troškova



SI.6.23 Odnos specifične energije potrebne pri usitnjavanju i krupnoće sirovine (Kaplan, 1987.)

6.1.9 ODREĐIVANJE OSLOBAĐENOSTI I KOMPATIBILNOST POSTUPAKA

Pri određivanju stepena oslobađanja minerala iz neke sirovine prihvaćen je princip, koji se koristi kod izvođenja kvantitativne mineraloške analize, po kome se pri merenju i utvrđivanju zastupljenosti datog minerala u specimenu, uzima da je

$$V_1 : V_2 : V_3 : V_n = S_1 : S_2 : S_3 : S_n =$$

$$L_1 : L_2 : L_3 : L_n = N_1 : N_2 : N_3 : N_n$$

otuda sledi da se može prihvatiti sledeći izraz

$$V_m = S_m = L_m = N_m$$

odnosno da je: udeo datog minerala izražen zapreminom zrna V_m jednak udelu tog istog minerala meren ekvivalentnom površinom preseka zrna S_m (na poliranoj površini rudnog preparata), odnosno da je jednak udelu tog minerala merenog dužinom odsečka L_m (prečnika zrna na presečima zrna) duž profilske linije snimanja, kao i da je jednak udelu tog minerala merenog brojem tačaka N_m (sa unapred određenom gustinom skokova) koje padaju na površinu datog minerala duž postavljene trase snimanja.

Kod određivanja stepena oslobađanja minerala (usitnjene i usko klasirane mineralne sirovine) važi:

Količinska zastupljenost jednog minerala u slobodnim zrnima u odnosu na njegovu ukupnu zastupljenost u sirovini (u slobodnim i sraslim zrnima) naziva se stepenom oslobađanja minerala u sirovini.

$$L_m = \frac{a}{a + a'} \cdot 100 \quad (\%)$$

gde su:

a – količinska zastupljenost minerala u slobodnim zrnima izražena na različite načine (kao masa M , g; M , %; N_z , kao broj zrna; kao V_z , zapremina zrna; kao N_t , broj tačaka; N_i , broj impulsa; kao L_i , dužina odsečaka; P_i , veličina površina i druge veličine),

a' – količinska zastupljenost minerala u sraslim zrnima takođe izražena na različite načine (kao masa M , g; M , %; kao N_z , broj zrna; kao V_z , zapremina zrna; N_t , broj tačaka; N_i , broj impulsa; L_i , dužina odsečaka; P_i , veličina površina i druge veličine merene faze).

Preporuka je da se merenja, odnosno snimanja oslobađanja datog minerala, na jednom uzorku ili rudnom preparatu vrše više puta (najmanje tri puta) i da se stepen oslobađanja izrazi kao srednja vrednost, i kao takva će imati viši stepen pouzdanosti.

Objedinjavanjem rezultata stepena oslobađanja minerala, iz svih klasa krupnoće, može da se prikaže obrascem za integralni stepen oslobađanja (ISO) datog minerala u toj sirovini (i za određenu finoću mlevenja).

$$ISO = \frac{\sum (M_i \cdot Me_i \cdot L_{m_i})}{\bar{Me} \cdot 100} \quad (\%)$$

gde su:

M_i – maseni udeli pojedinačnih klasa

Me_i – sadržaj metala u klasama krupnoće

L_{m_i} – stepen oslobađanja minerala u datoj klasi

$\bar{Me}$ – srednji sadržaj metala u sirovini.

Da bi smo ovo dobili, neophodno je sirovinu klasirati, hemijskom analizom utvrditi sadržaj traženog elementa, i nekim postupkom utvrditi količinu minerala u slobodnim zrnima kao i u sraslim mineralizovanim zrnima.

U slučaju da je sadržaj metala određen kao srednja vrednost iz više merenja, kao i da je oslobađanje datog minerala snimana više puta i data takođe svojom srednjom vrednošću, ISO se iskazuje prema

$$ISO = \frac{\sum (M_i \cdot \bar{Me}_i \cdot \bar{L}_m)}{\bar{Me} \cdot 100} \quad (\%)$$

gde su:

$\bar{Me}_i$ – srednji sadržaj metala u klasi krupnoće;

$\bar{L}_m$ – srednja vrednost stepena oslobađanja iz više merenja.

Za većinu (prirodnih) mineralnih sirovina potpuno oslobađanje, svih faza, odnosno mineralnih vrsta, se retko postiže tokom usitnjavanja, tako da proizvodi usitnjavanja obično sadrže i izvesnu količinu složenih - sraslih zrna, tj. zrna koja se sastoje od dva ili više minerala. Međutim, ipak je vrlo važno znati količinsku zastupljenost složenih, sraslih zrna, jer ona ili odlaze u koncentrat i time snižavaju njegov kvalitet (opada srednji sadržaj minerala u njemu) ili u jalovinu, u kom slučaju imamo gubitke datog minerala. Treću mogućnost, za koju mora da se razmotri rešenje, jeste da srasla zrna, nakon izdvajanja slobodnih zrna korisnog minerala i slobodnih zrna jalovine, budu vraćena u proces na dodatno usitnjavanje, radi daljeg postupka oslobađanja. Efikasnost usitnjavanja može se odrediti analizom proizvoda, klasirane usitnjene sirovine.

UNOŠENJE POPRAVNOG KOEFICIJENTA. Merenja preseka mineralnih zrna, na poliranim površinama rudnih preparata, izvode se uglavnom na dvodimenzionalnim slikama. Kako se utvrđivanje stepena oslobađanja minerala odnosi na rad sa usitnjenom (samlevenom) sirovinom odnosno merenja se vrše na trodimenzionalnim zrnima, neophodno je uneti i određene stereološke korekcije. Čak i snimanja oslobađanja stereobinokularnim mikroskopom zahtevaju, zbog nekomfornosti rada, unošenje izvesnih korekcija.

Kako zapravo dobiti zapreminsku raspodelu komponenti u jednom fragmentiranom sistemu (samlevena sirovina) iz rezultata linijskog ili planimetrijskog snimanja na rudnim preparatima? Problem se donekle pojednostavljuje ako su ispunjene sledeće pretpostavke:

- ♦ da su zrna u briketiranim rudnim preparatima sferična i istih dimenzija (uskoklasirana sirovina),
- ♦ da je broj mineralnih faza u preparatu limitiran na dve.

Ovi zahtevi se relativno lako mogu zadovoljiti, time što će analizirani specimen sadržati relativno istu krupnoću zrna, odnosno biće usko klasirana sirovina; takođe je uvek moguće tretirati mineralnu sirovinu bez obzira koliki je broj minerala prisutan u asocijaciji, tako što će ispitivani mineral predstavljati fazu A, a svi ostali, koliko god da ih ima, zajedno fazu B.

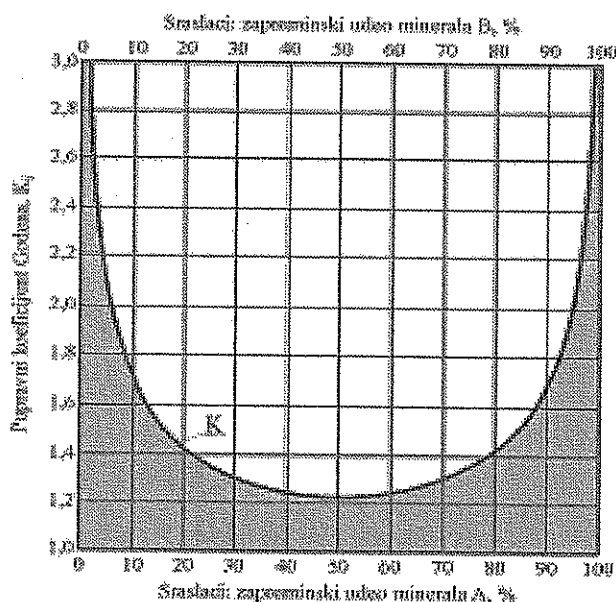
Gaudin (1939.) je u svojim izučavanjima jasno uočio problem transformacije, (prevođenje 1-D i 2-D merenja u trodimenzijne realne vrednosti) tako da uvodi "popravni koeficijent". Mada sam Gaudin (1939.) nikada nije opisao strukturu svoje čestice-sraslog zrna, danas se zna da je to dvofazna sferična čestica sa planarnom granicom među konstituentima (Moore, 1981, 1985.). Dolivo-Dobrovolski (1963.) analitički razmatra Gaudin-ov popravni koeficijent (prikazan na slici 6.24) i dolazi do rešenja da se radi o jednoj iz porodice krivih Pirsona. Kriva je drugog reda i ima oblik:

$$y = y_0 \left[1 - \frac{x^2}{a^2} \right]^m$$

gde parametri zadovoljavaju uslov $-1 < m < 0$ i $a > 0$, a x leži u granicama $-a < x < +a$. Minimum funkcije je za $x=0$, a ordinata je $y=y_0$. Ako se za apscisu uzme vrednost A, a za K ordinatu V.V.Dolivo-Dobrovolski (1963.) daje konačnu formulu dobijanja popravnog koeficijenta.

$$K = \frac{16,69}{\sqrt[3]{A \cdot (100 - A)}}$$

Autor predlaže nomogram za jednostavno grafičko očitavanje vrednosti stepena oslobađanja na osnovu prosečnog udelela posmatrane faze u sraslacima.



Sl.6.24 Dijagram Godena, zavisnost popravnog koeficijenta K, od srednje zapreminske vrednosti minerala u sraslacima.

U svojim izučavanjima Barberi (1977, 1978, 1981, 1983.) se pri razmatranju stereološke korekcije polazi od sledećih pretpostavki:

- ♦ sva zrna su konveksna, sva su istih dimenzija i sva imaju isti oblik (mada ni oblik ni veličina se ne moraju znati)
- ♦ svi sraslaci imaju planarnu dodirnu površinu između faza A i B čiji su delovi konveksni,

- ♦ distribucija volumetrijskog sadržaja sraslaca odgovara dvoparametarskoj beta distribuciji.

Danas se često pribegava simulaciji merenja na specifičnim česticama, a zatim se određuje procedura transformacije.

6.1.10 KOMPATIBILNOST MODELA OSLOBAĐANJA

Čitav niz do danas ponuđenih načina izražavanja oslobađanja bitno se međusobno razlikuju: - kako po karakterizaciji struktura, - karakterizaciji čestica nakon fragmentacije sistema - po tome da su jedni modeli krajnje uprošćeni, a drugi kompleksni sa pratećim statističkim ili matematičkim aparatom, po tome koliko su primenjeni postupci reprezentativni, kao i po tome koliko tačno mogu da izraze neke realne vrednosti oslobađanja. Brzo snimanje oslobodenosti, prognoziranje što tačnijih rezultata, određivanje optimalnih uslova otvaranja sirovine pri najboljim ekonomskim pokazateljima postavlja se kao imperativ. Međutim, primenu određenih, u svetu prihvaćenih metoda utvrđivanja oslobodenosti minerala, treba usloviti stepenom tehnološke osvojenosti sirovine, odnosno tipom i vrstom rude, na čega treba posebno obratiti pažnju. Kod modeliranja oslobađanja minerala, čine se izvesne pretpostavke neophodne da bi se realno kompleksna sirovina pojednostavila i učinila pogodnom za modeliranje kako po strukturnim karakteristikama i razmeštaju mineralnih faza tako i po odnosu zastupljenih faza. Takođe je od značaja da li je jedan od konstituenata krupnozrnaste strukture ili pak u vidu impregnacija u osnovnoj masi? Time se fenomen oslobađanja uvek može svesti na binarni model, a analize izvoditi za svaki konstituent posebno. Uslov da polimineralni sistem ne pokazuje nikakvu sklonost lomljenju, predisponiranim pravcima ili duž granica zrna, je a priori zadovoljen kod većine sistema u čemu se slažu mnogi autori.

U svakom slučaju, vrlo je značajno, utvrđivanje preliminarne pokazatelja o tome kako će se sirovina ponašati u procesu usitnjavanja, odnosno kakve su mogućnosti njenog otvaranja i sa kakvom će se lakoćom i kojim intenzitetom željeni minerali oslobađati.

Poznavanjem veličine indeksa sraslosti za dati mineral moguće je dobiti i niz drugih karakteristika sirovine. Tako imamo empirijski izraz kojim se povezuje stepen oslobađanja date mineralne faze α (odabranog minerala) sa vrednošću specifične slobodne površine koji je dat kao (Steiner, 1985.):

$$L_{\alpha}(D) = 1 - S_{V_{\alpha}}^{(i)}(D) / S_{V_{\alpha}}^{(e)}(D)$$

$$S_{V_{\alpha}}^{(e)}(D) > S_{V_{\alpha}}^{(i)}(D)$$

gde su:

$L_{\alpha}(D)$ - je udeo faze α koja je oslobođena pri krupnoći zrna (D);

$S_{V_{\alpha}}^{(i)}(D)$ - je veličina interne površine faze α sa fazom β po jedinici zapremine faze α , za čestice krupnoće (D);

$S_{V_{\alpha}}^{(e)}(D)$ - je veličina eksterne površine faze α po jedinici zapremine faze α , za čestice krupnoće (D).

Slobodne površine o kojima je reč, u gornjem izrazu, mogu se dobiti bilo linijskim ili planimetrijskim postupkom; kao što je to već pokazano u ranijem tekstu. Prema tome ovi izrazi

se mogu koristiti pri utvrđivanju oslobođenosti (Steiner, 1985.), stereološkim postupcima, prema sledećem izrazu:

$$L_{\alpha}(D) = 1 - B_{\alpha}^{(i)}(D) / B_{\alpha}^{(e)}(D) = 1 - I_{\alpha}^{(i)}(D) / I_{\alpha}^{(e)}(D)$$

gde su:

$B_{\alpha}^{(i)}(D)$ - dužina (veličina) rubova međufaznih kontakata faza α/β , merenih na površini briketiranih rudnih preparata, koje čine čestice, krupnoće (D);

$B_{\alpha}^{(e)}(D)$ - dužina rubova eksternih kontakata faza α i matriksa, merenih na isti način; odnosno

$I_{\alpha}^{(i)}(D)$ - je broj tačaka preseka profilske linije snimanja na mestima međufaznih dodira faza α i β za čestice krupnoće (D);

$I_{\alpha}^{(e)}(D)$ - je broj tačaka preseka duž profilske linije snimanja na mestima dodira faze α i matriksa (α / matriks), za čestice krupnoće (D).

Steiner-ov empirijski model može lako biti primenljiv i ne zahteva testiranja na standardizovanim materijalima.

Polazeći od iste osnove numeričke karakterizacije struktura G.Barberi, G.Huyet i G.Gateau (1979.), detaljno razrađujući postupak određivanja oslobođanja minerala na osnovu linijskih snimanja pomenutih indeksa. Predlaže se određivanje gustine međufaznih kontakata ispitivanih minerala bilo polarizacionim rudnim mikroskopom ili analizatorom slike.

Linijska snimanja, kao i izračunavanje oslobođenosti minerala u funkciji veličine slobodnih površina, su osnova radova G.Grant-a i dr. (1977.), G.Grant-a i Reid-a (1981.), G.Grant-a, P.Miller-a i A.F.Reid-a (1981.b). Snimanja su vršena na analizatoru slike sa sistemom QEM*SEM. Grant-ov (1981.b) kumulativni priraštaj oslobođenosti minerala je u tesnoj korelativnoj vezi sa količnikom slobodne površine S_R , koji se iskazuje odnosom slobodnih površina merene faze α prema sumi slobodnih površina faze α i ukupne površine internih kontakata faze α i svih drugih, faza β . Na osnovu ovih saznanja P.R.Miller i A.F.Reid (1982.), izvode izraz "normalizovane verovatnoće asocijacije" tretiranih minerala koji definiše stepen slučajnosti međufaznih kontakata asocijacije različitih minerala u specimenu.

$$N.A.P_{(ij)} = \frac{S_{V(ij)}}{S_{V(i)} - S_{V(ij)}} \cdot \frac{1 - V_{V(i)} - V_{V(j)}}{V_{V(j)}}$$

$S_{V(ij)} = 2 C_{ij}/L$ - veličina dodirne površine između minerala;

$S_{V(i)}$ - veličina površine po jedinici zapremine za svaki mineral;

$$S_{V(i)} = 2 \cdot \left(\sum_k C_{ik} \right) / L$$

$S_{V(i)}$ - veličina površine po jedinici zapremine za svaki mineral;

$V_{V(i)}$ - zapreminski udeo datog minerala, dobijen na osnovu udela površina;

$V_{V(i)}$ - zapreminski udeo datog minerala, dobijen na osnovu udela površina.

Gornji izraz je takođe primenljiv i za slučaj tačkastog snimanja visoke gustine. Određivanje slobodnih površina i gustine međufaznih kontakata minerala pruža numerički podatak u karakterizaciji struktura. Ovi podaci mogu biti snimani različitim laboratorijskim metodama ali su međusobno kompatibilni. Izvestan broj ovih izraza - o složenosti struktura - neposredno je postavljen u direktnu vezu sa određivanjem stepena oslobođenosti (Steiner, 1975; Grant, 1982.). Preporučuje se i jedan planimetrijski metod M.A.Berube, J.C.Marchand, (1984.), određivanja oslobođenosti minerala u proizvodima koncentracije.

Postupak nije kompatibilan sa drugim metodama jer je oslobođanje definisano kao matematičko očekivanje volumetrijske zastupljenosti korisnog minerala u sklopu mineralizovanih čestica, odnosno čestica koje delom ili u potpunosti čine koristan mineral. Oslobođenost se određuje odnosom ukupne površine preseka praćenog minerala prema ukupnoj površini mineralizovanih čestica. Oslobođenost je u direktnoj funkcionalnoj zavisnosti od strukturnih karakteristika sirovine (prvenstveno krupnoća zrna) kao i uslova usitnjavanja. Vrednosti oslobođenosti minerala su uvek nešto previšene u odnosu na realne, i zavise od stepena usitnjenosti sirovine. Karakteristika ovog specifičnog postupka je definisan raspon u kome se kreću vrednosti za oslobođenost. Naime, ona ne može biti manja od sadržaja datog minerala u uzorku, pa do 100% kad je reč o monomineralnim česticama.

Visoka kompatibilnost sa većinom modela pokazuje i postupak "linearne udeone oslobođenosti" R.P.King-a (1979.). Oslobođenost datog minerala (magnetita) prognozirana prema King-u (1979.), iskazana je preko udeone oslobođenosti, po jednačini:

$$L_m(D) = 1 - 1/\mu_m \int_0^D \{1 - N(l|D)\} \cdot \{1 - F_m(l)\} dl \quad (1)$$

gde su:

$L_m(D)$ - frakciona oslobođenost minerala veličine zrna D;

μ_m - matematičko očekivanje linearnih odsečaka minerala;

D_m - najkrupnije čestice u populaciji;

$F_m(l)$ - funkcija distribucije linearnih odsečaka minerala;

$N(l|D)$ - je funkcija distribucije linearnih odsečaka preko čestica krupnoće D do D_m , najdužih odsečaka.

A integralni stepen oslobođanja ima formu:

$$L_m = \int L_m(D) \cdot p(D) \cdot dD$$

$p(D)$ - je funkcija distribucije učestalosti krupnoće čestica.

Model je zasnovan na utvrđivanju funkcije distribucije mono i višefaznih odsečaka pri profilisanju, na slučaj, fragmentiranog sistema. Postupak je primenljiv za rad na rudnom mikroskopu tako i na analizator slike različitih sistema.

Karakterizacija struktura i prognožiranje ponašanja sirovine može se utvrditi i na nefragmentiranim specimenima rudnih preparata primenom razrađenog postupka (King, 1982.). On odnos linearnih odsečaka preko faza daje u formi:

$$\int_0^1 N_{(i)} \cdot f_{M(i-u)} \cdot du = \frac{1}{\mu_M - \mu_G}$$

gde su:

$N_{(i)}$ - srednja vrednost broja odsečaka minerala duž preseka čestica dužine l;

$f_{M(i)}$ - je funkcija verovatnoće učestalosti linearnih odsečaka preko jedne faze u primarnoj rudi;

$\mu_{(M)}$ i $\mu_{(G)}$ - srednji linearni odsečki preko minerala ili jalovine u primarnoj rudi.

Kasnija izučavanja J.A.Finch-a i W.Petruk-a (1984.) koji razrađuju ovaj model predlažu transformacije koje bi otklonile izvesne netačnosti u predelu krupnijih zrna. Testiranja su pokazala da je najprihvatljivija solucija u kojoj figuriše eksponencijalna forma za $N(l/D)$. Tako se predlaže:

$$L_m(D) = 1 - \frac{D}{2 \cdot \mu_m + D} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{2 \cdot \mu_m + D}{\mu_m}\right) \right]$$

Ova konačna forma testiranog modela se preporučuje mineralozima u svim stadijumima tehnološke osvojenosti rude. Kod sprovedene karakterizacije struktura i poznate distribucije

krupnoća čestica date sirovine nakon fragmentiranja, nekim od procesa PMS, testiranje realnog stereološkog identiteta, sa odnosom faza u čestici moguće je sprovesti programom PAR-GEN. Program je zasnovan na tehnici Monte-Karlo simulacije (Lin, 1985.).

Model oslobađanja *Wiegela* (1965.) sa vrlo složenim pratećim računskim aparatom, premda vrlo dobrim, ne može biti kompatibilan sa gore iznetim.

UTVRĐIVANJE ZAKONA RASPODELE. U cilju utvrđivanja zakona raspodele - distribucije linearnih odsečaka, odnosno veličine zrna magnetita, neophodno je bilo izračunati osnovne statističke veličine na ranžiranim i klasiranim odsečcima. Na osnovu dobijenih vrednosti za matematička očekivanja, centralne momente, asimetriju i ekscesu, utvrđeno je da distribucija linearnih odsečaka ili krupnoća zrna magnetita, odgovara log-normalnom zakonu raspodele. Ovo će nam omogućiti u daljem radu, da se uz pomoć računa teorije verovatnoće i primenu *Gaus-Laplas*-ove funkcije izračunaju verovatnoće pojavljivanja slobodnih zrna magnetita u pojedinim klasama krupnoće, prethodno samlevene sirovine do određene finoće. Statistička obrada podataka linearnih odsečaka, izražena u logaritamskoj formi, prikazana je u tablici 6.2.

Statističkom obradom rezultata merenja linearnih odsečaka, za mineral magnetit, kao i utvrđivanja zakona raspodele, dobijeni su sledeći parametri:

♦ srednja vrednost odsečka (krupnoća zrna)

$$\bar{l}_{lg} = 1,65 \text{ (} l = 45 \text{ } \mu\text{m)},$$

♦ standardna devijacija

$$\sigma_{lg}^2 = 0,3678 \text{ (} \sigma = 2,33 \text{ } \mu\text{m)}$$

♦ koeficijent varijacije

$$V_{log} = 1,33238 \text{ (} V = 21,50 \text{ \%)}$$

♦ centralni moment trećeg reda

$$m_{3lg} = 0,0089975 \text{ (} m_3 = 1,0209 \text{)}$$

♦ koeficijent asimetrije

$$A_{lg} = 0,181 \quad A/\sigma_A^3 = 2,718 < 3 \text{ (} A = 1,5171 \text{)}$$

♦ centralni moment četvrtog reda

$$m_{4lg} = 0,044084 \text{ (} m_4 = 1,1067 \text{)}$$

♦ koeficijent spljoštenosti

$$E_{lg} = m_4/\sigma^4 - 3 = -0,591; E/\sigma_E = 2,263 < 3 \text{ (} E = 0,25666 \text{)}$$

Provera kriterijuma normalnosti: raspodela odgovara log-normalnoj.

Analizom distribucije linearnih odsečaka za magnetit - izračunavanjem srednje geometrijske vrednosti prečnika zrna, centralnih momenata, asimetrije, ekscesa i testiranja skupa, utvrđeno je da raspodela krupnoće zrna magnetita u matičnoj rudi odgovara log-normalnom zakonu raspodele. Ovo će nam omogućiti u daljem radu da se uz pomoć teorije verovatnoće i primenu *Gaus-Laplas*-ove funkcije normalne raspodele, izračunaju verovatnoće pojavljivanja slobodnih zrna magnetita u pojedinim klasama krupnoće, samlevene sirovine do određene finoće mlevenja. Oabrana krupnoća, na osnovu koje će biti prognozirani stepen oslobođenosti, jeste srednja geometrijska vrednost krupnoće agregata kristala magnetita, odnosno krupnoća zrna rude.

Merenja izvršena na seriji rudnih preparata, metodom *Rosinval-Shand*-a i statistička obrada podataka o distribuciji linearnih odsečaka, odnosno krupnoći zrna magnetita, dali su osnovne podatke o strukturnim karakteristikama matične rude (srednje krupnoće zrna, učestalost i vrste intergranularnih kontakata minerala).

MODEL PROGNOZIRANJA. Na osnovu utvrđenog zakona raspodele (distribucije linearnih odsečaka), modeliranja struktura minerala u datoj sirovini, bilo je moguće izvršiti prognoziranje oslobađanja minerala tokom usitnjavanja rude.

U tablici 6.3 prikazan je postupak, obrade podataka na primeru glavnog rudnog minerala - magnetitu, i primena *Gaus-Laplas*-ove funkcije verovatnoće na podatke merenja veličine zrna magnetita.

Za prikazani postupak prognoziranja u tablici 6.3, korišćena je funkcija verovatnoće data izrazom:

$$F(d) = \left[\exp \left\{ - \left(\log d - \log \bar{d} \right)^2 / 2 (\log \sigma)^2 \right\} \right] / \left[\log \sigma \cdot (2\pi)^{1/2} \right]$$

gde su: $F(d)$ -funkcija verovatnoće; d -prečnik zrna, a $\bar{d}$ -srednja geometrijska vrednost, ($d = \bar{l}$); σ - standardna devijacija.

♦ Utvrđeno je da se za srednji prečnik zrna magnetita, koji iznosi 45 μm , odnosno rudu samlevenu do finoće čiji je srednji prečnik (D_{50}) iste ili približne veličine, može očekivati oslobođenost magnetita 100 % za krupnoću zrna ispod 6,3 μm ; oslobođenost će iznositi 47 % za sva zrna čija je krupnoća do 15,9 μm , dok će oslobođenost magnetita do krupnoće zrna od 25 μm iznositi 40 %; a oslobođenost ovog minerala će iznositi svega 1 % ukoliko krupnoća pređe 400 μm .

Tablica 6.2 Distribucija linearnih odsečaka za magnetit

Klase krupnoće zrna (μm)	Učestalost f_i	Granice intervala l_{lg}	Sredina intervala $\hat{l}_{lg}$	$\hat{l}_{lg} \cdot f_i$	$\Delta l^2 \cdot f_i$	$\Delta l^3 \cdot f_i$	$\Delta l^4 \cdot f_i$
4-6.3	2	0.6-0.8	0.7	1.4	1.805	-1.715	1.629
6.3-10.1	38	0.8-1.0	0.9	34.2	21.375	-16.031	12.023
10.1-15.9	81	1.0-1.2	1.1	89.1	24.500	-13.476	7.412
15.9-25.2	284	1.2-1.4	1.3	369.2	34.790	-12.177	4.262
25.2-40.0	281	1.4-1.6	1.5	421.5	6.323	-0.948	0.142
40.0-63.4	186	1.6-1.8	1.7	316.2	0.465	0.023	0.001
53.4-100.5	284	1.8-2.0	1.9	539.6	17.750	4.438	1.109
100.5-159.0	138	2.0-2.2	2.1	289.8	27.945	12.575	5.659
159.0-252.4	94	2.2-2.4	2.3	216.2	39.715	25.815	16.780
252.4-400.0	18	2.4-2.6	2.5	45.0	13.005	11.054	9.396
400.0-633.95	1	2.6-2.8	2.7	2.7	1.102	1.158	1.216
633.95-1004.75	1	2.8-3.0	2.9	2.9	1.562	1.953	2.441
Σ	1408		2327.80			12.668	62.070

Tablica 6.3 Prognoza oslobodjenja magnetita

Klase krupnoće zrna (μm)	Učestalost Zf_i	Faktor transformacije Z_i^*	Funkcija nor- malne distri- bucije F_{Gauss}	Verovatnoća P_{KSO}	Verovatnoća P_{KSO}	Verovatnoća P_{KSO}	Inverzna verovatnoća $q=1-P_i$	Teorijski verovatan broj zrna koja nisu oslobodjena	Stvarno utvrđjen broj zrna koja su oslobodjena	Očekivana verovatno- ća oslobodjenih zrna pri datoj krupnoći $D_0=66.72 \mu\text{m}$	Frakcijska oslobo- đjenost prema Kingu (1982.) po jednadžbi
4.0-6.3	2	-3.05682	0.4988	0.0012	0.9988	0.0012	0.0012	2/1408	2/1408	100%	0.97
6.3-10.1	40	-2.51303	0.4939	0.0060	0.9939	0.0060	0.0060	40/1408	40/1408	79%	0.91
10.1-15.9	121	-1.96923	0.4756	0.0244	0.9756	0.0244	0.0244	121/1408	121/1408		0.83
15.9-25.2	405	-1.43444	0.4222	0.0778	0.9222	0.0778	0.0778	405/1408	405/1408	72%	0.71
25.2-40.0	686	-0.88164	0.2106	0.2894	0.7106	0.2894	0.2894	686/1408	686/1408		0.58
40.0-63.4	872	-0.33785	0.1331	0.3669	0.6331	0.3669	0.3669	872/1408	872/1408	41%	0.42
63.4-100.5	1156	+0.20595	0.0832	0.4168	0.5832	0.5832	0.5832	1156/1408	1156/1408	29%	0.27
100.5-159.0	1294	0.74974	0.2734	0.2266	0.7734	0.7734	0.7734	1294/1408	1294/1408	15%	0.15
159.0-252.4	1388	1.29354	0.3015	0.1985	0.8015	0.8015	0.8015	1388/1408	1388/1408	18%	0.08
252.4-400.0	1406	1.83733	0.4671	0.0329	0.9671	0.9671	0.9671	1406/1408	1406/1408	3%	0.05
400.0-633.9	1407	2.38112	0.4913	0.0087	0.9913	0.9913	0.9913	1407/1408	1407/1408	1%	0.03
633.9-1004.7	1408	2.92492	0.4982	0.0018	0.9982	0.9982	0.9982	1408/1408	1408/1408	0%	0.00
Σ	1408										

$$1) z_i = \left(\frac{t_i - \bar{t}}{\sigma} \right) \cdot \sigma$$

2) Normalna funkcija verovatnoće F_{G} 3) Verovatnoća drugadija $P_{\text{KSO}} = 0.5 \cdot P_{\text{G}}$; $F_{\text{KSO}} = 1 - P_{\text{KSO}}$; $a \in D_0$; $a \in D_0$ 4) Inverzna verovatnoća $q = 1 - P$ 5) Srednja dužina odsečka D_0 (66.72 μm)

U drugoj prikazanoj varijanti, za srednji prečnik (D_{sr}) koji iznosi 75 μm , verovatnoća pojave slobodnih zrna magnetita iznosiće 69 % za sva zrna čija je krupnoća do 15,9 μm ; oslobođenost magnetita do krupnoće zrna sirovine do 40 μm iznosi 62 %; i tako dalje. Navedeni podaci se odnose na potpunu oslobođenost zrna agregata kristala magnetita.

Ovako koncipiran model prognoziranja oslobođenosti minerala omogućuje da se izračuna verovatnoća pojave slobodnih zrna magnetita i za bilo koju drugu vrednost srednjeg prečnika zrna. Naime, moguće je dati prognozu oslobođenosti magnetita, sa visokom verovatnoćom, za bilo koju krupnoću (D_{sr}) pri različitim finoćama mlevenja. Integralna oslobođenost zrna magnetita će svakako biti mnogo veća pa treba računati na mnogo bolje efekte iskorišćenja tokom koncentracije, ali sa smanjenim kvalitetom zbog prisustva sraslih zrna magnetita.

6.1.11 UTVRĐIVANJA OSLOBOĐENOSTI UZ POMOĆ STEREOBINOKULARNOG MIKROSKOPA

Jedan od najčešće korišćenih postupaka utvrđivanja stepena oslobođenosti minerala na samom pogonu ili laboratoriji za PMS, može odrediti relativno brzo i sa jednostavnim priborom. Svaki opit meljivosti, ili određena finoća mlevenja sirovine, zahtevaju sagledavanje oslobođenosti minerala, u jednom relativno kratkom vremenskom periodu, sa jednom određenom tačnošću kako bi mogli nastaviti započeta ispitivanja mogućnosti koncentracije. Rad sa stereobinokularnim mikroskopom (pri relativno malim povećanjima) na reprezentativnom uzorku, usko klasirane sirovine, predstavlja jedan grubi orijentacioni uvid u oslobođenost minerala iz sirovine. Već u stadijumu grubog mlevenja, ovakvim ispitivanjima, se može utvrditi da li se minerali iz sirovine zadovoljavajuće oslobađaju. Svakako da će se ispitivanja sirovine pri visokim finoćama mlevenja i relativno velikoj oslobođenosti sprovoditi drugim, preciznijim i tačnijim metodama.

Prednosti ovoga postupka ispitivanja je u tome da uzorak ne zahteva specijalnu pripremu. A kod mana postupka se navode – poteškoće identifikacije minerala pod binokularom; poteškoće procene udela merenog minerala u sraslim zrnima (stereološka greška), bez obzira na mogućnosti okretanja zrna i osmatranja sa svih strana; poteškoće pri radu sa vrlo sitnim zrnima pri relativno većim uvećanjima (zrna sitnija od 0,038 ili čak 0,020 mm su vrlo naporna za rad i zahtevaju znatno strpljenje i vremena).

Postupak rada:

♦ usitnjena (najčešće samlevena) sirovina se usko klasira, pri čemu se preporučuje da to bude ručno i mokrim postupkom.

♦ svaka klasa krupnoće se uzorkuje i izdvoji reprezentativni uzorak za mikroskopska ispitivanja (2–4 cm^3) kao i odgovarajuća količina uzorka za hemijsku analizu.

♦ uzorak za mikroskopska ispitivanja se rasprostire na predmetno staklo – pločicu mikroskopa, u monosloju, a zatim staklenim štapićem izdela na, recimo desetak polja, radi kasnijeg lakšeg rada. Korisno je, naročito ako je istraživač od ranije upoznat sa mineralnim sastavom sirovine, da se staklena pločica premaže tankim slojem glicerina, vazelina ili nekog providnog lepka ("Oho"), kako bi se zrna fiksirala na pločici i time olakšao rad.

♦ snimanja vršiti redom po izdvojenim segmentima na pločici, a rezultate beležiti u unapred pripremljene obrasce ili snimati na diktafonu ukoliko to uslovi rada zahtevaju. Zavisno od klase krupnoće koja se ispituje ponekad je neophodno izvršiti merenja i na više pločica uzastopno. To je čest slučaj kod krupnih zrna, odnosno tamo gde na odgovarajuću površinu pločice stane relativno mali broj zrna da bi imao pri obradi podataka određenu statističku pouzdanost.

♦ dobijeni podaci se obrađuju za svaku klasu krupnoće i izračunava stepen oslobođenosti datog ili više minerala. A rezultati svih klasa krupnoće, znači za dati uzorak sirovine objedinjuju se u integralnom stepenu oslobađanja (ISO).

Pri snimanju na staklenoj pločici za mineralizovana zrna (samo zrna od datog minerala kao slobodna ili srasla zrna čiji samo jedan manji ili veći deo čini dati mineral) vrši se procena da li je zrno samo od jedne mineralne vrste (i to one koju upravo merimo) znači slobodno zrno, ili je sraslo zrno sa određenim udelom minerala koji se meri, i čiju ćemo zastupljenost u jediničnom zrnju proceniti. Način procene ilustrovan je na slici 6.25.

Primer merenja stepena oslobođenosti na jednoj Pb-Zn rudi sa galenitom, sfaleritom, piritom, halkopiritom, pirotinom, kvarcom i kalcitom dat je u narednoj tablici 6.4. Prikazan je način beleženja podataka u obrascu i postupak izračunavanja. Prikazana je najkrupnija klasa pri mlevenju sirovine u trajanju t , minuta.



STEPEŃ OSLOBOĐENOSTI GALENITA. Rosiwal-Schand-ov postupak kvantitativnog određivanja zastupljenosti i praćenja odnosa pojedinih minerala u rudnim preparatima je poslužio za određivanje stepena oslobođenosti minerala samlevene, usko klasirane mineralne sirovine. Postupak se sastojao u prekrivanju čitave površine rudnog preparata paralelnim profilskim linijama, čija je gustina eksperimentalno određena, a uslovljena je krupnoćom zrna minerala u datoj klasi. Metod je matematički korektan, sa visokim stepenom reproduktivnosti rezultata, i jednostavan za sam rad.

Na Sl. 6.26 prikazane su krive oslobođenosti galenita po uskim klasama krupnoće, za 4 uzorka, pri različitim finoćama mlevenja minerala (podaci iz tablice 6.6). U daljem radu se koriste korigovane vrednosti (unet Gaudin-ov korektivni faktor) stepena oslobođenosti za ispitivane minerale. Krive su predstavljene u polinomskom obliku trećeg stepena.



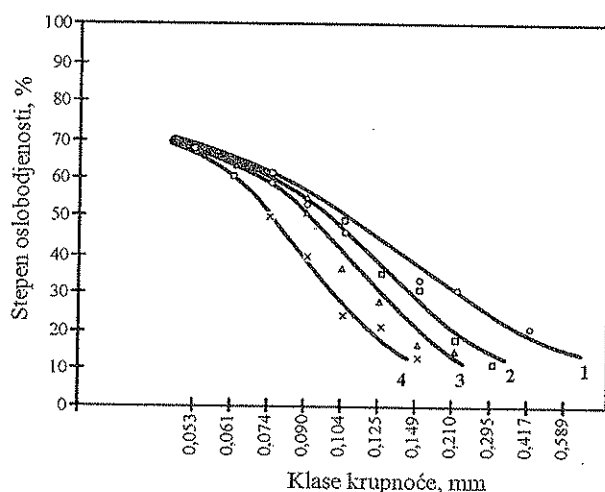
Sl.6.25 Procena udela datog minerala u zrnima usitnjene i usko klasirane (monodisperzne) mineralne sirovine.

Tablica 6.4 Oslobađanje minerala sfalerita stereobinokularnim mikroskopom
Sirovina: Pb-Zn ruda, ležišta Belo Brdo; klasa krupnoće -0,589+0,417 mm

Tip srastanja	Učestalost, celihi zrna i delova zrna, (udio faze u srastlom zrnju)	Ukupni broj zrna	Ukupni broj jedinica zrna (delovi jedinica)	Prosečan udio merenog minerala u srastlim zrnima (A)	Stepen oslobađanja (merene vrednosti) L_n	Godenov koeficijent srastlosti $k_1 = \frac{16,69}{\sqrt[3]{A \cdot (100 - A)}}$	Učešće korekcije $K_1 \times L_n$	Raspodela minerala u slobodnim i srastlim zrnima	Stepen oslobađanja (korigovane vrednosti) L_n
I.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Monomineralna zrna									
Sfalerit	IIII IIII IIII IIII	19			46,23	1,00	46,23	40,89	
Bimnneralna zrna									
ZnS+PbS	0,50; 60, 20; 50; 5	5	2,3	0,46	3,60	1,23	6,89	6,09	
ZnS+SiO ₂	0,30; 60, 30; 50; 90, 40; 10; 90, 30; 40; 10; 70, 30; 50; 40; 90, 50; 20; 0,80; 10; 40; 70; 60; 40; 50; 2	26	12,4	0,48	30,17	1,23	37,11	32,83	
ZnS+FeS ₂	0,30; 10; 50; 40; 2	5	1,5	0,30	3,65	1,30	4,74	4,19	
ZnS+...	nema								
Trimnneralna zrna									
ZnS+PbS+SiO ₂	0,30; 40; 10; 40; 20; 30; 30; 10; 50; 0,30; 60; 70; 30; 50; 50; 40; nema	16	5,9	0,37	14,75	1,26	18,08	15,99	
ZnS+...									
Polimnneralna zrna									
ZnS+...	nema								
Suma		71	22,1	0,435	100,00	1,24	117,05	106,06	59,17

$$1^* 22,1 : (71-19) = 0,425$$

$$2^* k_1 = \frac{16,69}{\sqrt[3]{42,5 \cdot (100 - 42,5)}} = 1,239$$



Sl. 6.26 Stepen oslobođenosti minerala galenita po klasama krupnoće za četiri ispitivane finoće mlevenja. (1-vreme mlevenja 5 min, 47,00 % -0,053 mm 2-vreme mlevenja 10 min, 53,46 % -0,053 mm 3-vreme mlevenja 25 min, 78,23 % -0,053 mm, 4-vreme mlevenja 45 min, 88,53 % -0,053 mm)

Kriva 1 prikazuje stepene oslobođenosti galenita po klasama krupnoće za najmanju finoću mlevenja. ISO za datu finoću mlevenja iznosi 70,09 %. Kriva 2 prikazuje stepene oslobođenosti galenita za sledeću višu finoću mlevenja. ISO za ovaj uzorak ima niži stepen oslobođenosti po pojedinačnim analiziranim klasama krupnoće. Ova pojava je uočljiva za najkrupnije klase krupnoće jer produženim vremenom mlevenja krupna oslobođena zrna se dalje usitnjavaju, i prelaze u sitnije klase krupnoće gde povećavaju stepen oslobođenosti, a smanjuju isti u najkrupnijim klasama. Kriva 3 prikazuje stepen oslobođenosti galenita pri narednoj većoj finoći mlevenja, gde ISO galenita za datu finoću iznosi 90,57 %. U sitnijim klasama krupnoće dolazi do priraštaja samlevenog materijala, a time i oslobođenosti, upravo iz krupnijih klasa krupnoće. Kriva 4 prikazuje oslobođenost galenita pri najvišoj finoći mlevenja, što rezultira izuzetno visokim ISO koji iznosi 94,90 %.

Zajedničko za sva četiri opita meljivosti je relativno ujednačen rast stepena oslobođenosti galenita, kod najsitnijih klasa krupnoće, uslovljen osobinama ovoga minerala. Naime, galenit kao mek mineral javlja se u rudi srastao sa mineralima veće tvrdine i manje izraženom cepljivošću pa se u procesu usitnjavanja lako haba i krui. Zbog tih svojih osobina učešće galenita se u sraslacima javlja daleko ispod 50 %, a često je udeo galenita u sraslom zrnju zanemarljiv (8 %). Kohezivne sile uzduž granica zrna su veće od unutrašnjih kohezivnih sila nutar zrna, pa se prelom u većini slučajeva ostvaruje preko granica zrna. To znači da će se već slobodna zrna lakše dalje usitnjavati, nego što će se srasla zrna lomiti duž graničnih plosni pa oslobođenost tokom mlevenja opada u pojedinačnim klasama krupnoće (upoređujući L_m u istim klasama krupnoće, a pri različitim finoćama mlevenja). Ova se može lako uočiti sa prikazom priraštaja stepena oslobođenosti u funkciji finoće mlevenja galenita za svaku individualnu klasu krupnoće pojedinačno.

Kako je jedini nosilac olova u datoj Pb-Zn rudi mineral galenit, a cinka mineral marmatit to je raspodeli metala odgovarala raspodela minerala. Najmanja finoća mlevenja minerala za uzorak mleven 5 minuta iznosila je 35,15 % proseva sita 0,053 mm za marmatit, odnosno 47,04 % proseva sita 0,053 mm za galenit. Najveća finoća mlevenja minerala za uzorak mleven 45 minuta iznosila je 87,87 % proseva sita 0,053 mm za marmatit, odnosno 88,53 % proseva sita 0,053 mm za mineral galenit. Prema tome mineral galenit se brže usitnjavao od minerala marmatita, kako pri niskim finoćama tako i pri visokim, s napomenom da su razlike u meljivosti daleko izraženije na početku mlevenja. Finoća mlevenja praćena je i za samu sirovinu. Najmanja finoća mlevenja rude iznosila je 34,46

%, a najveća finoća mlevenja rude iznosila je 82,88 % proseva sita 0,053 mm.



6.1.12 UTVRĐIVANJA OSLOBOĐENOSTI RUDNIM POLARIZACIONIM MIKROSKOPOM

Snimanje oslobođenosti minerala rudnim mikroskopom, bilo kojim metodom (tačkasti, linijski, planimetrijski) i bilo kojim tipom analize slika, zahteva da se pridržavamo određene procedure rada i manje - više koristi se ista metodologija obrade podataka i prikazivanje rezultata. Zbog značaja koji se daje ovakvim ispitivanjima biće prikan jedan kompletan postupak obrade podataka merenja i prikazivanja dobijenih rezultata.

❖ **Primer.** Postupak određivanja oslobođenosti minerala hajkopirita iz jedne Pb-Zn-(Cu) rude, uz pomoć rudnog polarizacionog mikroskopa, linijskom metodom, uz pomoć Šandovog integracionog stočića, kao i način obrade i prikazivanja rezultata, biće ilustrovan u narednim tablicama.

Da bi se dobila zavisnost veličine integralne oslobođenosti datog minerala u odnosu na moguću promenu finoće mlevenja same sirovine, bilo je neophodno izvesti sledeće:

- ❖ na reprezentativnim uzorcima usitnjene sirovine izvršiti opite meljivosti (vidi tablicu 6.5. primer galenita);
- ❖ uzorke svakog opita meljivosti, pojedinačno, usko klasirati standardnom serijom sita i svaku klasu hemijski analizirati na sadržaj elementa koji se ispituje;
- ❖ izračunavanjem raspodele (ili racionalnom analizom) pokazati i razlike u finoći mlevenja sirovine, odnosno finoći mlevenja minerala (jednog ili više njih);
- ❖ od izdvojenih uzoraka svake klase krupnoće, napraviti briketirane rudne preparate za mikroskopska ispitivanja;
- ❖ izvršiti identifikaciju minerala u asocijaciji i odrediti tip i intenzitet srastanja, odrediti strukturne karakteristike minerala;
- ❖ na svakom rudnom preparatu izvršiti merenja (prema raspoloživim uređajima i tačnosti kojom se žele rezultati dobiti);
- ❖ merene podatke unositi u zapisnike snimanja - odgovarajuće tablice i izračunati stepen oslobođenosti datog minerala kao "merene vrednosti";
- ❖ prema podacima merenja i procene o odnosu minerala u sraslim zrnima i statističkom obradom podataka, uneti popravne koeficijente (korekcija stereološke transformacije);
- ❖ izračunati stepene oslobođenosti minerala za svaku klasu krupnoće kao "korigovane vrednosti", tablice 6.6 - 6.12;
- ❖ u narednoj tablici 6.13 su prikazani objedinjeno, svi podaci za sve klase krupnoće, kako za "merene" tako i za "korigovane vrednosti" o stepenu oslobođenosti minerala;
- ❖ u tablici 6.14 su prikazani podaci o raspodeli sraslih zrna prema tipu srastanja za svaku klasu krupnoće na kojoj su vršena merenja;
- ❖ u tablici 6.15 su, pored masenog udela svake klase krupnoće analiziranog uzorka, dati sadržaji metala, raspodela metala, stepen oslobođenosti ili sraslosti, i raspodela, odnosno udeli metala na srasla i slobodna zrna (kod sraslih zrna po tipovima srastanja);
- ❖ na osnovu prikazanih podataka izračunava se integralni stepen oslobođenosti za dati mineral, sa navođenjem pri kojoj finoći mlevenja sirovine i datog minerala je postignut;
- ❖ za neki drugi mineral (ili više njih) iz iste sirovine postupak se ponavlja istim redosledom;
- ❖ za naredni opit meljivosti (optimalno 3-4 opita) procedura, za iste minerale se ponavlja na isti način.

Tablica 6.5. Stepen oslobađanja galemla u funkciji finocice mlevenja sirovine i minerala

Klasa kрупноće u mm	Stepen oslobađanja									
	L ₁ = 5 min. (1*)		L ₁ = 10 min.		L ₁ = 25 min.		L ₁ = 45 min.			
	M ₁ , %	L ₁ , %	M ₁ , %	L ₁ , %	M ₁ , %	L ₁ , %	M ₁ , %	L ₁ , %	M ₁ , %	L ₁ , %
L										
-0.833+0.589	0.90									
-0.589+0.417	4.78	20.64								
-0.417+0.295	10.53	8.12	1.28	11.51						
-0.295+0.210	10.46	30.66	2.71	17.75	0.78	29.41				
-0.210+0.149	12.54	34.18	13.51	30.40	1.07	16.52				
-0.149+0.125	4.05	40.27	5.02	44.91	1.41	27.50	0.49			
-0.125+0.104	3.60	42.42	4.46	49.32	2.36	40.65	0.53			
-0.104+0.090	5.87	51.05	8.22	54.44	5.55	51.45	0.72			
-0.090+0.074	7.29	59.14	9.33	61.42	10.07	61.56	1.88			
-0.074+0.061	2.23	62.66	2.44	60.66	2.34	63.13	6.01			
-0.061+0.053	3.47	67.73	4.60	66.65	3.17	66.73	2.40			
-0.053+0.000	34.46	100.00	48.43	100.00	73.17	100.00	82.88			
Radar:	100.00	ISO = 70.00 %	100.00	ISO = 76.93 %	100.00	ISO = 90.57 %	100.00	ISO = 94.96 %		

1* Vreme zadržavanja u mlincu sa kuglama (u minutima).

2* Finocica mlevenja sirovine izražena kao maseni udio podređenog granulata sita 0.053mm (može biti i 2000 ili 4000).

3* Finocica mlevenja minerala izražena kao maseni (%) udio finog minerala u prasecu sita 0.053mm (izračunat kao nusproizvod finog metala).

Tablica 6.6 Stepen oslobađanja minerala kalikapiritita, klasa krupnoće -0,417+0,295 mm, rudni preparat 1.

No.	Slobodna zrna i tipovi srastanja	Merenje veličine (podatka, površina, broj tačaka)			Merenje vrednosti					Korigovane vrednosti			
		r (mm); s (mm) ³	n	%	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.	1.												
1.	CuFeS ₂ - slobodan	1,01		41,56		1,00	1,00	41,56		41,56	33,14		
2.	CuFeS ₂ + FeS ₂	0,42		17,28		0,1040,90	1,73	58,44	29,57	29,89	23,84		
3.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S	0,88		36,21		0,5040,50	1,23		61,96	44,54	35,52		
4.	CuFeS ₂ + CuS												
5.	CuFeS ₂ + SiO ₂	0,08		3,29		0,9540,10	2,14		5,63	7,04	5,61		
6.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + CuS												
7.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + SiO ₂												
8.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + FeS ₂												
9.	CuFeS ₂ + polimim.	0,04		1,66		0,2040,80	1,43		2,84	2,37	1,89		
10.	Sumarni podaci:	2,43		100,00			1,43	160,00	100,00	125,40	100,00		100,00

$$1^* 2,43 : 100 = 1,01; x \quad x = 41,56\%$$

$$2^* k_1 = \frac{16,69}{\sqrt[3]{(A \cdot (100 - A))}} = \frac{16,69}{\sqrt[3]{(10 \cdot (100 - 10))}} = 1,73$$

$$3^* 58,44 : 100 = 17,28; x \quad x = 29,57\%$$

$$4^* 125,40 : 100 = 125,40; x \quad x = 33,14\%$$

Tablica 6.7 Stepen oslobađanja minerala halkopirita, klasa krupnoće -0,295+0,208 mm, rudni preparat 2.

No.	Slobodna zrna i tipovi srastanja	Merene vrijednosti				Korigovane vrijednosti				
		Merene veličine (odbočaka, površina, broj tjesten)		Prosečni odnos faza u srastlin. zrnima	Godenov koeficijent k	Udeo slobodnih i srastlih zrna u uzorku (L_n)	Raspodjela srastlih zrna	Unošenje popravnog koeficijenta (4 x 6)	Raspodjela slobodnih i srastlih zrna u uzorku	Udeo slobodnih i srastlih zrna u uzorku, %
		f (mm); s (mm) ² ; n	% udeo							
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
1.	CuFeS ₂ - slobodan	5,71	50,53	1,00	1,00	56,31	-	56,31	44,75	44,75
2.	CuFeS ₂ + FeS ₂	0,64	0,11	0,200/0,80	1,43	43,69	14,44	9,02	7,17	55,25
3.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S	1,62	15,98	0,400/0,60	1,25		36,56	19,97	15,87	
4.	CuFeS ₂ + CuS	0,30	2,96	0,950/0,05	2,14		6,78	6,33	5,03	
5.	CuFeS ₂ + SiO ₂	-	-	-	-		-	-	-	
6.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + CuS	-	-	-	-		-	-	-	
7.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + SiO ₂	0,08	0,79	0,950/0,05	2,14		1,82	1,69	1,34	
8.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + FeS ₂	0,49	4,89	0,950/0,05	2,14		11,06	10,34	8,23	
9.	CuFeS ₂ + polimorf.	1,30	12,82	0,100/0,90	1,73		29,34	22,18	17,62	
10.	Sumarni podaci:	10,14	100,00	-	1,59	100,00	100,00	125,84	100,00	100,00

Tablica 6.8 Stepen oslobađanja minerala halkopirita, klasa krupnoće -0,208+0,147 mm, rudni preparat 3.

No.	Slobodna zrna i tipovi srastanja	Merene vrijednosti				Korigovane vrijednosti				
		Merene veličine (odbočaka, površina, broj tjesten)		Prosečni odnos faza u srastlin. zrnima	Godenov koeficijent k	Udeo slobodnih i srastlih zrna u uzorku (L_n)	Raspodjela srastlih zrna	Unošenje popravnog koeficijenta (4 x 6)	Raspodjela slobodnih i srastlih zrna u uzorku	Udeo slobodnih i srastlih zrna u uzorku, %
		f (mm); s (mm) ² ; n	% udeo							
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
1.	CuFeS ₂ - slobodan	6,00	95,56	1,00	1,00	65,86	-	65,86	55,86	55,86
2.	CuFeS ₂ + FeS ₂	0,28	3,07	0,150/0,85	1,54	34,14	8,99	4,73	4,01	44,14
3.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S	1,34	14,71	0,600/0,40	1,25		43,09	18,39	15,59	
4.	CuFeS ₂ + CuS	-	-	-	-		-	-	-	
5.	CuFeS ₂ + SiO ₂	0,17	1,87	0,950/0,05	2,14		5,48	4,00	3,29	
6.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + CuS	0,13	1,44	0,950/0,05	2,14		4,19	3,06	2,59	
7.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + SiO ₂	0,03	0,33	0,950/0,05	2,14		0,97	0,71	0,60	
8.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + FeS ₂	0,24	2,65	0,950/0,05	2,14		7,70	5,63	4,77	
9.	CuFeS ₂ + polimorf.	0,92	10,10	0,150/0,85	1,54		20,58	15,55	13,19	
10.	Sumarni podaci:	9,11	100,00	-	1,53	100,00	100,00	117,93	100,00	100,00

Tablica 6.9 Stepen oslobađanja minerala halkopirita, klasa krupnoće -0,147+0,104 mm, rudni preparat 4.

No.	Slobodna zrna i tipovi srastanja	Mjerne vrijednosti				Korigovane vrijednosti				
		Mjerne veličine (odbočaka, površina, broj tečaka)		Prosečni odnos faza u srastlin. zrnima	Godenkov koeficijent k	Udeo slobodnih i srastlih zrna u uzorku (L_n)	Raspodjela srastlih zrna	Uvođenje popravnog koeficijenta (4 x 6)	Raspodjela slobodnih i srastlih zrna u uzorku	Udeo slobodnih i srastlih zrna u uzorku, %
		f (mm); s (mm ²); n	% udeo							
1.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	
1.	CuFeS ₂ - slobodan	17,18	82,64	1,00	1,00	82,64	...	82,64	75,78	75,78
2.	CuFeS ₂ + FeS	0,18	0,96	0,1000,90	1,73	17,36	4,95	1,49	1,37	24,22
3.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S	1,98	9,52	0,7000,30	1,30		54,84	12,38	11,35	
4.	CuFeS ₂ + CuS	0,28	1,36	0,9500,05	2,14		7,83	2,91	2,67	
5.	CuFeS ₂ + SiO ₂	0,19	0,91	0,9500,05	2,14		5,25	1,95	1,79	
6.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + CuS	...	...	...	...		...	...	...	
7.	CuFeS ₂ + CuS + SiO ₂	0,20	0,96	0,9500,05	2,14		5,53	2,05	1,89	
8.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + FeS	0,08	0,38	0,9500,05	2,14		2,19	0,81	0,74	
9.	CuFeS ₂ + polimn.	0,70	3,42	0,2000,80	1,43		19,41	4,82	4,42	
10.	Sumarni podaci:	20,79	100,00	-	1,52	100,00	100,00	109,05	100,00	

Tablica 6.10 Stepen oslobađanja minerala halkopirita, klasa krupnoće -0,104+0,074 mm, rudni preparat 5.

No.	Slobodna zrna i tipovi srastanja	Mjerne vrijednosti				Korigovane vrijednosti				
		Mjerne veličine (odbočaka, površina, broj tečaka)		Prosečni odnos faza u srastlin. zrnima	Godenkov koeficijent k	Udeo slobodnih i srastlih zrna u uzorku (L_n)	Raspodjela srastlih zrna	Uvođenje popravnog koeficijenta (4 x 6)	Raspodjela slobodnih i srastlih zrna u uzorku	Udeo slobodnih i srastlih zrna u uzorku, %
		f (mm); s (mm ²); n	% udeo							
1.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	
1.	CuFeS ₂ - slobodnih	20,98	89,24	1,00	1,00	89,24	—	89,24	82,47	82,47
2.	CuFeS ₂ + FeS ₇	0,18	0,77	0,2000,80	1,43	10,76	7,16	1,10	1,02	17,53
3.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S	1,26	5,36	0,9000,10	1,73		49,81	9,27	8,57	
4.	CuFeS ₂ + CuS	0,09	0,39	0,9500,05	2,14		3,53	0,81	0,75	
5.	CuFeS ₂ + SiO ₂	0,17	0,72	0,9500,05	2,14		6,69	1,54	1,42	
6.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + CuS	—	—	—	—		—	—	—	
7.	CuFeS ₂ + CuS + SiO ₂	0,05	0,21	0,9500,05	2,14		1,95	0,45	0,42	
8.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + FeS ₇	0,03	0,13	0,9500,05	2,14		1,21	0,28	0,26	
9.	CuFeS ₂ + polimn.	0,75	3,19	0,1000,90	1,73		29,65	5,52	5,09	
10.	Sumarni podaci:	23,51	100,00	—	1,76	100,00	100,00	108,21	100,00	100,00

Tablica 6.11 Stepen oslobađanja minerala halopirita, klasa krupnoće -0,074+0,053 mm, rudni preparat 6.

No.	Slobodna zrna i tipovi srastanja	Mjerne vrijednosti				Korigovane vrijednosti				
		Mjerne veličine (osobaka, površina, broj točaka)		Prosečni odnos faza u srastlinama	Godenov koeficijent k	Udeo slobodnih i srastlih zrna u uzorku (L_n)	Raspodjela srastlih zrna	Uvođenje popravnog koeficijenta (4 x 6)	Raspodjela slobodnih i srastlih zrna u uzorku	Udeo slobodnih i srastlih zrna u uzorku, %
		I (mm ²); n	% udeo							
1.	3.	5.	4.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	
1.	CuFeS ₂ - slobodan	19,15	96,48	1,00	1,00	96,48	93,13	96,48	93,13	93,13
2.	CuFeS ₂ + FeS ₂	0,11	0,55	0,05/0,95	2,14	3,52	15,63	1,18	1,14	6,87
3.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S	0,29	1,46	0,05/0,95	2,14		41,48	3,12	3,01	
4.	CuFeS ₂ + CuS	0,06	0,30	0,05/0,95	2,14		8,52	0,64	0,62	
5.	CuFeS ₂ + SiO ₂	0,04	0,20	0,05/0,95	2,14		5,68	0,43	0,41	
6.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + CuS	—	—	—	—		—	—	—	
7.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + SiO ₂	—	—	—	—		—	—	—	
8.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + FeS ₂	—	—	—	—		—	—	—	
9.	CuFeS ₂ + polimn.	0,20	1,01	0,10/0,90	1,73		28,69	1,75	1,69	
10.	Sinarni podatak	19,85	100,00	—	2,02	100,00	100,00	103,60	100,00	100,00

Tablica 6.12 Stepen oslobađanja minerala halopirita, klasa krupnoće -0,053+0,038 mm, rudni preparat 7.

No.	Slobodna zrna i tipovi srastanja	Mjerne vrijednosti				Korigovane vrijednosti				
		Mjerne veličine (osobaka, površina, broj točaka)		Prosečni odnos faza u srastlinama	Godenov koeficijent k	Udeo slobodnih i srastlih zrna u uzorku (L_n)	Raspodjela srastlih zrna	Uvođenje popravnog koeficijenta (4 x 6)	Raspodjela slobodnih i srastlih zrna u uzorku	Udeo slobodnih i srastlih zrna u uzorku, %
		I (mm ²); n	% udeo							
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
1.	CuFeS ₂ - slobodan	26,91	99,19	1,00	1,00	99,19	98,38	99,19	98,38	98,38
2.	CuFeS ₂ + FeS ₂	0,03	0,11	0,95/0,05	2,14	0,81	13,58	0,24	0,24	1,72
3.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S	0,05	0,18	0,95/0,05	2,14		22,22	0,38	0,38	
4.	CuFeS ₂ + CuS	0,01	0,04	0,95/0,05	2,14		4,94	0,09	0,09	
5.	CuFeS ₂ + SiO ₂	—	—	—	—		—	—	—	
6.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + CuS	—	—	—	—		—	—	—	
7.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + SiO ₂	0,03	0,18	0,95/0,05	2,14		22,22	0,38	0,38	
8.	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + FeS ₂	—	—	—	—		—	—	—	
9.	CuFeS ₂ + polimn.	0,08	0,30	0,95/0,05	2,14		37,04	0,64	0,63	
10.	Sinarni podatak	27,13	100,00	—	2,14		100,00	109,92	100,00	100,00

Tablica 6.13 Granulometrijski i kemijski sastav samelvene sirovine i stepen oslobođenosti halkopirita (merene vrednosti, Godenov popravljeni koeficijent, korigovane vrednosti oslobođenosti i integralni stepen oslobođenosti)

Klase rupnoće, u mm	Maseni udio klase M, %	Sadržaj metala Cu, %	Raspodela metala R _{met} %	Stepen oslobođenosti MERENE VREDNOSTI			Godenov koeficijent k (srednja vrednost)	Stepen oslobođenosti KORIGOVANE VREDNOSTI	
				L ₀ *	100-L ₀ *	100-L ₀ *		L ₀	100-L ₀
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
+0,295	2,40	1,13	1,02	31,56	58,44	1,43	1,43	33,14	66,86
-0,285+0,208	10,78	1,31	4,52	56,31	43,69	1,59	1,59	44,75	55,25
-0,208+0,147	16,50	2,42	12,79	65,86	34,14	1,53	1,53	55,86	44,14
-0,147+0,104	23,28	3,78	28,19	82,60	17,36	1,52	1,52	75,78	24,22
-0,104+0,074	14,03	3,85	17,31	89,24	10,76	1,76	1,76	82,47	17,53
-0,074+0,053	11,96	2,90	11,09	96,08	3,52	2,02	2,02	93,13	6,87
-0,053+0,038	11,19	4,10	14,69	99,19	0,81	2,14	2,14	98,25	1,72
-0,038+0,000	9,86	3,29	10,39	100,00	—	1,00	1,00	100,00	—
Rudar:	100,00	3,12	100,00	150,85,80	14,20	—	—	150,85,80	19,69

$$K_1 = \frac{16,69}{\sqrt{A \cdot (100 - A)}}, \text{ gde su: } K_1 - \text{Godenov popravljeni koeficijent; } A - \text{udio merene faze u srastlom zrna izražen u procentima.}$$

Tablica 6.14 Stepen oslobođenja minerala halkopirita — i raspodela (srastih zrna) prema tipovima srastanja (u odnosu na klase)

Klase kruptoće, mm	Stepen oslobođenosti minerala L ₀	Stepen srastlosti minerala (100-L ₀)	BL-mineralna srastanja			Tvl-mineralna srastanja			Poli-mineralna srastanja
			CuFeS ₂ + FeS ₂	CuFeS ₂ + Cu ₂ S	CuFeS ₂ + CuS	CuFeS ₂ + SiO ₂	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + CuS	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + FeS ₂	
1.	5.	6.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.
+0,295	33,14	66,86	23,84*	35,52	—	5,61	—	—	1,89
-0,285+0,208	44,75	55,25	7,17	15,87	5,03	—	—	1,34	8,22
-0,208+0,147	55,86	44,14	4,01	15,59	—	3,39	2,59	0,60	4,77
-0,147+0,104	75,78	24,22	1,37	11,35	2,67	1,79	—	1,88	0,74
-0,104+0,074	82,47	17,53	1,02	8,57	0,75	1,42	—	0,42	0,26
-0,074+0,053	93,13	6,87	1,14	3,01	0,62	0,41	—	—	—
-0,053+0,038	98,25	1,72	0,24	0,38	0,09	—	—	0,38	—
-0,038+0,000	100,00	—	—	—	—	—	—	—	—
Rudar:	80,31	19,69	—	—	—	—	—	—	—

* Podaci iz tabele 6.1, kolona 10.

Tablica 6.15 Stepen oslobađanja minerala halkopirita — korigovane vrednosti, i raspodela minerala na slobodna i tipove srastlih zrna (u odnosu na rudu)

Klasa krupnoće, mm	Maseni udio klase M _k , %	Sadržaj metala, % Cu, %	Raspodela metala, % R _{rel} , %	Stepen oslobađanja metala (L _m)	Udeo metala u slobodni m zrnima	Udeo metala u srastlim zrnima	Bi-mineralna srastanja				Tri-mineralna srastanja			Pol- mineralna srastanja
							CuFeS ₂ + FeS ₂	CuFeS ₂ + Cu ₂ S	CuFeS ₂ + CuS	CuFeS ₂ + SiO ₂	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + CuS	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + SiO ₂	CuFeS ₂ + Cu ₂ S + FeS ₂	
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.
+0.295	2.40	1.13	1.02	35.14	0.34 ^{1*}	0.69 ^{1*}	0.24 ^{2*}	0.36	—	0.06	—	—	—	0.02
-0.285+0.208	10.78	1.31	4.52	44.75	2.05	2.47	0.32	0.70	0.23	—	—	0.06	0.37	0.79
-0.208+0.147	16.50	2.42	12.79	55.86	7.15	5.64	0.52	1.99	—	0.43	—	0.07	0.61	1.69
-0.147+0.104	23.28	3.78	28.19	75.78	21.36	6.83	0.39	3.20	0.75	0.49	—	0.53	0.22	1.25
-0.104+0.074	14.03	3.85	17.31	82.47	14.28	3.03	0.18	1.48	0.13	0.25	—	0.07	0.04	0.88
-0.074+0.053	11.86	2.90	11.09	93.13	10.33	0.76	0.13	0.33	0.07	0.04	—	—	—	0.19
-0.053+0.038	11.19	4.10	14.69	98.28	14.43	0.26	0.04	0.06	0.01	—	—	0.06	—	0.09
-0.038+0.000	9.86	3.29	10.39	100.00	10.39	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—
Ruda:	100.00	3.12	100.00	80.31	2.51	0.61	1.82	8.12	1.19	1.27	0.33	0.79	1.24	4.91

1* $(33.14 \times 1.02) / 100 = 0.34\%$

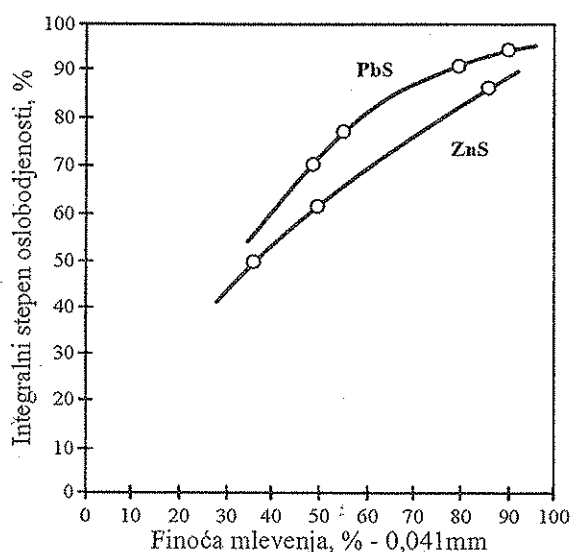
2* $(66.86 \times 1.02) / 100 = 0.68\%$

3* $(23.14 \times 1.02) / 100 = 0.24\%$ (iz tablice 6.14, kolona 8)

6.1.13 INTEGRALNI STEPEN OSLOBOĐENOSTI

ISO u funkciji finoće mlevenja datih minerala (galenita i marmatita), izračunatog prema raspodeli ovih minerala u referentnoj klasi krupnoće, prikazuje se kao na slici 6.27.

Sistematske promene oslobađanja, u pojedinačnim klasama krupnoće, kada se minerali posmatraju pri različitim finoćama mlevenja utiču na oblik koji pokazuje kriva ISO u funkciji finoće mlevenja. Dok je kod galenita prisutan visok priraštaj ISO za niske finoće mlevenja minerala i tendencija neznatnog priraštaja, pa čak i stagniranja ISO pri visokim finoćama mlevenja galenita, dotle je za marmalit uočljiva linearna zavisnost između ISO i finoće mlevenja marmatita. Slično ponašanju galenita zapaženo je i kod halkopirita.



Sl.6.27. Integralni stepen oslobođenosti galenita i marmatita u funkciji finoće mlevenja minerala, odnosno sirovine (diferencijalna meljivost)

U idealnom slučaju minerali koji se melju relativno teško trebalo bi da pokazuju veći stepen oslobađanja kada su umereno mleveni u odnosu na minerale koji se lakše melju u istom uzorku. To nije samo zato što tvrđi minerali tokom usitnjavanja stvaraju slobodna zrna, već dolazi i do priraštaja oslobođenosti u pojedinačnim klasama krupnoće tokom produženog trajanja mlevenja. Ova tendencija ispoljava slabije efekte pri većim finoćama mlevenja. Relativno meki minerali se ponašaju drugačije: pad oslobođenosti u pojedinačnim klasama krupnoće tokom mlevenja vodi ka neznatnom porastu ISO u funkciji finoće mlevenja. Ovaj efekat je naročito izražen kada su minerali umereno usitnjeni.

Bitna odstupanja u ponašanju minerala tokom oslobađanja, za minerale, koji se lako melju, u odnosu na one koji se teško melju, mogu biti od velikog značaja kada je njihovo ponašanje tokom oslobađanja unapred poznato. U tom slučaju se taj efekat može upotrebiti kao kriterijum klasifikacije, a minerali koji imaju približno iste osobine meljivosti se uključuju u iste grupe i mogu se međusobno porediti.

Da bi krive oslobođenosti, prikazane u funkciji krupnoća zrna sirovine, i krive ISO u funkciji finoće mlevenja minerala, mogle da posluže kod međusobnog po-

ređenja oslobođenosti za različite minerale ili sirovine, minerali bi morali biti samleveni do određenih – repernih finoća mlevenja, odnosno krupnoće zrna, inače se ove krive oslobođenosti za različite minerale ili različite sirovine ne bi mogli međusobno porediti. Način prikazivanja ISO u funkciji finoće mlevenja minerala dat je slici 6.27.

6.1.14 POJAVE STADIJNOSTI OSLOBAĐANJA MINERALA U PROCESU MLEVENJA

Tokom ispitivanja oslobađanja minerala, u funkciji finoće mlevenja i sadržaja korisnih komponenata, zapaženo je da se različiti minerali – konstituenti sirovine, oslobađaju različitom brzinom, odnosno da je priraštaj oslobođenosti u pojedinim klasama krupnoće veći nego u drugim. Ovi zapaženi skokovi, određeni kao stadijumi oslobađanja minerala, mogu se prikazati gradijentima priraštaja udela slobodnih zrna ispitivanih minerala za svaku klasu krupnoće pojedinačno. Drugim rečima, pri svim ostalim jednakim uslovima, određeni minerali se oslobađaju najbrže u jednoj određenoj klasi krupnoće.

Efekte različite meljivosti i oslobađanje minerala mogu se uzeti kao kriterijumi za klasifikaciju minerala u određene grupe, približno istih osobina meljivosti da bi mogli na taj način da se međusobno poredi. Sistematske promene oslobađanja u pojedinačnim klasama krupnoće u toku progresivnog diskontinuiranog mlevenja prikazuju se kao gradijenti oslobađanja za svaku diskretnu klasu krupnoće, u zavisnosti od finoće mlevenja ispitivane asocijacije minerala (odnosno udela minerala u klasi -0,053+0 mm).

Veličina gradijenta oslobađanja bitno utiče na položaj krive integralnog stepena oslobađanja kao funkcije finoće usitnjavanja minerala. Svrha konstrukcije dijagrama gradijenata oslobađanja, pored toga što pružaju mogućnost uvida o intenzitetu oslobađanja pojedinih minerala, tokom njihovog diskontinuiranog mlevenja, određuju i u kom segmentu distribucije krupnoća čestica je on najveći, je da omogućiti takođe i međusobno poređenje oslobađanja tih različitih minerala iz različitih sirovina.

Međusobno poređenje oslobođenosti je jedino moguće ako se ona meri pri istim finoćama mlevenja ispitivanih minerala. Tako je očitavana finoća mlevenja pri udelu 50% minerala u prosevu 50 mm, najsitnije klase. Ova veličina je jedan od elemenata konstrukcije etalonskih krivih ISO minerala u sirovinama istog ili sličnog genetskog tipa, a različite koncentracije korisnih minerala.

6.1.15 GRADIJENTI PRIRAŠTAJA OSLOBAĐANJA MINERALA

Ukoliko sirovinu posmatramo integralno, kao sistem asocijacije različitih (po svojim fizičkim osobinama) minerala, sa izvesnim opštim, zajedničkim karakteristikama, tada njihovim definisanjem možemo predvideti njeno ponašanje u procesu usitnjavanja.

Poznato je da se u postupku mlevenja (usitnjavanja) rude jedne asocijacije (prisutni minerali), ponašaju različito u pogledu oslobađanja. U izučavanim asocijacijama

minerala, istog genetskog tipa, uočene, manje ili veće individualne razlike u ponašanju, zavise prvenstveno, od međusobnog odnosa faza (srakturnih odnosa) prisutnih u sistemu (sirovini) i sadržaja korisnih minerala.

Međutim, ponekad grube i nedovoljno osetljive metode merenja (pri karakterizaciji minerala) nisu u stanju da registruju promene manjeg intenziteta. Prema tome, možemo reći da, uočene promene intenziteta oslobođenosti minerala karakterišu relativne osobine meljivosti sirovine, kakva je data asocijacija tih minerala u njoj.

Efekti različite meljivosti i oslobađanja mineralnih vrsta mogu se uzeti kao kriterijumi za klasifikaciju minerala u grupe, približno, istih osobina meljivosti da bi mogli na taj način međusobno da se porede.

Sistematske promene u priraštaju oslobađanja, od jedne do druge klase krupnoće, tokom progresivnog diskontinualnog mlevenja, mogu se prikazati grafički kao gradijenti oslobađanja za svaku diskretnu klasu krupnoće, u funkciji finoće usitnjavanja ispitivane asocijacije minerala, odnosno udela minerala u klasi $-0,053+0$ mm.

Apsolutne vrednosti priraštaja količine slobodnih zrna posmatraju se za svaku klasu posebno. Veličina gradijenta oslobađanja bitno utiče na sam položaj i oblik krive integralnog stepena oslobađanja u funkciji finoće mlevenja svakog minerala posebno.

Kada se posmatra snop krivih, koje pokazuju stepene oslobođenosti datog minerala po klasama krupnoće za različite finoće mlevenja, može se, vrlo često, uočiti da značajniji priraštaj oslobođenosti, za date mineralne vrste, nije isti u svim segmentima krupnoće. Takođe je česta pojava da se oslobođenost jednog minerala u istoj klasi krupnoće menja i da raste sa produžavanjem vremena trajanja procesa mlevenja. Priraštaji oslobađanja su izrazitiji u oblasti krupnijih klasa i sistematski se smanjuju u području mikroskopskih veličina čestica sirovine.

Ono što je zajedničko u analizi oslobađanja odnosi se na sledeće:

♦ priraštaji oslobođenosti kod različitih minerala nisu isti u svim rasponima krupnoće zrna, već se jasno ističu

intenzivniji priraštaji u određenom rasponu krupnoće zrna date sirovine;

♦ priraštaji oslobađanja su najintenzivniji, kod više zastupljenih minerala (bogatija sirovina), u predelu krupnijih klasa, dok su u predelu sitnijih zrna i priraštaji oslobođenosti neznatni ili stagniraju;

♦ istovremeno kod manje zastupljenih minerala (siromašnija sirovina) gradijenti priraštaja oslobađanja su mnogo manji u predelu krupnijih klasa sirovine, a znatno pak veći u predelu najsitnijih klasa krupnoće;

♦ priraštaj oslobođenosti jednog datog minerala iz dva različita uzorka, odnosno sirovine, drugačijih strukturnih karakteristika i sadržaja, će se manifestovati različitim intenzitetom. Isto će biti i u slučaju različitih minerala iz iste sirovine.

Svrha konstrukcije dijagrama gradijenata priraštaja oslobađanja je:

♦ da pruže mogućnost uvida u intenzitet oslobađanja različitih minerala, tokom njihovog diskontinuiranog mlevenja,

♦ da se može odrediti u kom segmentu distribucije krupnoća zrna je oslobađanje najveće, kao i

♦ da omogući međusobno poređenje intenziteta oslobađanja istih ili različitih minerala iz različitih uzoraka sirovina.

Međusobno poređenje oslobođenosti, je međutim, jedino moguće ako se ona meri pri istim finoćama mlevenja ispitivanih minerala. Zato se koristi očitavanje finoće mlevenja pri udelu 50% minerala u prosevu sita 0,053 mm (ili sita 0,074 mm), najistnije klase. Ova veličina je jedan od elemenata konstrukcije etalonskih krivih integralnog stepena oslobađanja minerala iz uzoraka sirovina istog ili sličnog genetskog tipa a različitog sadržaja korisnih minerala.

Rezultati ovakvih ispitivanja pokazali da se u pogonima PMS može kontinuirano pratiti oslobađanje minerala zajedno sa praćenjem finoće mlevenja u prelivu klasifikatora, praćenjem raspodele minerala i praćenjem samo jedne dodatne operacije, snimanjem stepena oslobođenosti minerala samo jedne, vrlo uske klase krupnoće, za datu sirovinu.

6.2 LITERATURA

1. Amstutz, G.C., Giger, H., 1972: "Stereological methods applied to mineralogy, petrology, mineral deposits and ceramics", Journal of Microscopy, Vol. 95, 145-164.
2. Andrews, J. R. G., and Mika, T. S., 1976: "Comminution of a heterogeneous material: development of a model for liberation phenomena", In: Proc. XIth Int. Miner. Proc. Congr., Cagliari, pp. 59-88.
3. Barbery, G., Huyet, G., Gateau, G., 1979: "Liberation analysis with the help of image analysis: theory and applications", Proc. XIIIth Min. Proc. Congress, Warsaw, vol. 2, 568-599.
4. Bodziony, J., 1965: "On the Possibility of Application of Integral Geometry Methods in Certain Problems of Liberation of Manual Grains", Bull. Acad. Polonaise des Sciences, Serie des Sciences Technique, 13, pp. 459-467.
5. Carver, E. Robert., 1971: "Procedures in sedimentary petrology". - Wiley-Interscience, New York.
6. Chayes, F., 1949: "A sample point counter for thin-section analysis". - Am. Mineralogist, 34, 1-11.
7. Chayes, F., 1956: "Petrographic modal analysis". - John Wiley and Sons, p. 113.
8. Choi, W. Z., et al., 1988: "Liberation Modeling Using Automated Image Analysis", International Journal of Processing, 22, pp. 59-73.
9. Cohen, H. E., 1983: "Energy usage in mineral processing". Trans. I.M.M., 92, C160- C164.
10. Coleman, R., 1981: "The stereology of layered spheres", 3rd European Symposium on Stereology, Ljubljana.
11. Davy, P. J., 1984: "Probability Models for Liberation", J. Applied Probability, 21, pp. 260-269.

12. Delesse, A., 1848: "Procede mecanique pour determiner la composition des roches". - Ann. des Mines, 13, 379-388.
13. Denev, S., Stoicova, R., Boteva, A., 1985: "Razkrivane i flotacija na mineralite". - Tekhnika, Sofia.
14. Draškić, D. at all, 1990: "Use of the Unite Flotation Cell in Lece Pb-Zn Ore Flotation plant," -III Int. Min. Process. Symp., 587-593. Istanbul.
15. Finch, J. A., Petruk, W., 1984: "Testing a solution to the King liberation model", Inter. J. Min. Proc., 12, 305-311.
16. Fleet, W. F., 1926: "Petrological notes on the Old Red Sandstone of the West Midlands". - Geol. Mag., 63, 505-516.
17. Galehouse, J. S., 1969: "Counting grain mounts: number percentage vs. number frequency". - J. Sed. Pet., 39, 812-815.
18. Galehouse, S. Jon., 1971: "Point Counting, - in Procedures in sedimentary petrology". - Wiley-Interscience, New York.
19. Gateau, C., Prevosteau, J. M., 1978: "Examples of the applications of new possibilities for automatic image analysis", In: Quantitative analysis of Microstructure, pp.273-278.
20. Gaudin, A. M., 1939: "Principles of Mineral Dressing", McGraw Hill, New York, USA, 1st Ed.
21. Glagolev, A.A., 1933: "On the geometrical methods of quantitative mineralogical analysis of rocks", (in Russian). - Trans. Inst. Econ. Min., Moscow, 59, 1-47.
22. Glagolev, A. A., 1934: "Quantitative analysis with the microscope by the point method". - Engineering Mining J., 135, 399.
23. Grant, G. et al., 1981: "Feature extraction and population from complex ore particles by QEM SEM image analysis", In Kalisnik (ed.), 223-238.
24. Greenman, N. N., 1951: "The mechanical analysis of sediments from thin-section data". - J. Geol., 59, 447-462.
25. Jones, M. P., 1982: "Designing an X-ray Images Analyser for Measuring Mineralogical Data", XIV International Mineral Processing Congress, Toronto.
26. Jones, M. P., Barbary, G., 1975: "The size distribution and shapes of mineral in multiphase materials: particle determination and use in mineral process design and control", XIth International Mineral Processing Congress, Cagliari, paper 36.
27. Jones, M. P., 1977: "Automatic Image Analysis", Physical Methods in Determinative Mineralogy, J.Zussman 2nd Edition London Academic Press, 167.
28. Kaplan, L. J., 1987: "Research and development on size reduction is urged to save energy". Chem.Eng., 28, pp 33-34.
29. King, R. P., 1983: "Stereological methods for the prediction and measurement of mineral liberation", In De Villiers and Cawthorn ed., pp. 443-447.
30. King, R. P., 1979: "A model for the quantitative estimation of mineral liberation by grinding", Int. J. Miner. Process, 6, 207-220.
31. King, R. P., 1982: "The Prediction of mineral liberation from mineral texture", XIVth International Mineral Processing Congress, Toronto.
32. Klimpel, R. P. and Austin, L. G., 1983: "A preliminary model of liberation from a binary system", Powder Technol., 34, pp.121-130.
33. Lin, C. L., et al., 1987: "Comparison of Methods for the Measurement of Linear Grade Distribution in Liberation Analysis", Particle Characterization, 4, pp.78-82.
34. Lin, C. L., et al., 1984: "Prediction of Volumetric Abundance from Two-Dimensional Mineral Images", ICAM 84, Los Angeles.
35. Lin, S. L. at al., 1985: "An Evolution of Procedures for the Measurements of Linear Distributions in Liberation Analysis", AIME Anual Meeting, New York, pp.18-28.
36. Lowrison, G. C., 1974: "Crushing and Grinding: The Size Reduction of Solid Materials". Butterworths, pp 60, London.
37. Malvik, T., 1982: "An Empirical model to Establish the Liberation Properties of Minerals" - XIV International Mineral Processing Congress, Toronto.
38. Marin Ž., 1996: "Stepen oslobađanja galenita i marmatita rude ležišta Rudnik - Gornji Milanovac", - Diplomski rad, RGF, Beograd.
39. Miller, P. R., Reid, A.T., Zuiderwyk, M. A., 1982: "QEM-SEM Image Analysis in the determination of Model Assay, Mineral Association and Mineral Liberation", XIV IMPC, Toronto, VIII 3.1-3.20.
40. Moore, S. M., 1983: "The Stereological Measurement of Mineral Particles", Mineral Resources Engineering Research Progress Report No3, Imperial College, London.
41. Moore, S. W. and Jones, M. P., 1981: "Stereological calculations of Volumetric Particle Compositions from Linear Measurements", Paper presented at 3rd European Symposium on Stereology, Ljubljana.
42. Packham, G. H., 1955: Volume-, weight-, and number-frequency analysis of sediments from thin-section data. - J. Geol., 63, 50-58.
43. Peltó, C. R., 1952: The mechanical analysis of sediments from thin-section data: a discussion. - J. Geol., 60, 402-406.
44. Peterson, R. D. et al., 1985: "Estimation of Kinetic Parameters of a Grinding - Liberation Model", Int. J. Min. Proc. 14, pp.111-126.

45. Rajamani, K., Herbst, J. A., 1983: "Simultaneous estimation of selection and breakage functions from batch and continuous grinding data". IMM Trans. C.
46. Rosiwal, A., 1898: *Über geometrische Gesteinsanalysen*. - Verh. der Kaiserlich-Königlichen Geol. Reichsanstalt, 143-175.
47. Ruebush, J. C., 1982: "Simulator for individual mineral behavior in an integrated grinding and flotation plant." M.S. Thesis, Univ. of Utah, Salt Lake City, Utah.
48. Ruebush, J. C., Herbst, J. A. and Rajamani, K., 1980: "SIMPLANT - a program for simulation of individual mineral behavior in an integrated grinding and flotation circuit". University of Utah, Salt Lake City.
49. Russ, C. John., 1986: *Practical stereology*. - Plenum press, New York and London.
50. Serra, J., 1982: "Image analyses and mathematical morphology", Academic Press, London.
51. Shand, S. J., 1916: A recircling micrometer for geometrical rock analysis. - J. Geol., 24, 394-404.
52. Steiner, H. J., 1975: "Liberation Kinetics in Grinding Operations", In Proc. XIth Int. Min. Proc. Cong. Cagliari, 35-58.
53. Tomanec, R., 1992: "Complex ore modelling, texture and mineral liberation", *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 25, p.155-163, Wrocław.
54. Tomanec, R., 1993: "Oslobađanje minerala iz kompleksnih ruda na osnovu njihove diferencijalne meljivosti", *Tehnika*, 5-6, Rud. Geol. Metal., Beograd.
55. Tomanec, R., 1989: "Degree of Mineral Liberation Depending on Useful Component Concentration and Fineness of Grid", (Thesis), Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, Belgrade.
56. Tomanec, A. R., 1990: "Differential Milling Properties of Minerals Used in a Mineral Liberation Model at Real Multiphase System", III Inter. Min. Proc. Simp., Istanbul, Turkey.
57. Van der Plas, L., 1962: "Preliminary note on the granulometric analysis of sedimentary rocks". - *Sedimentology*, 1, 145-157.
58. Wiegel, R. L. and Li, K., 1967: "A Random Model for Mineral Liberation by Size Reduction", *Transactions SME/AIME* 238, pp. 179-189.
59. Wiegel, R. L., 1964: "A quantitative approach to mineral liberation", In: Proc. 7th Int. Miner. Process. Congr., New York. pp.3-9.
60. Wiegel, R. L., 1976: "An Integrated Size Reduction Mineral Liberation Model", *Trans. AIME*, 260, pp. 147-152.
61. Wiegel, R. L., 1975: "Liberation in Magnetite Iron Formation", *Trans. AIME*, 260, pp. 147-152.

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

7

SADRŽAJ GLAVE 7

7.1 ISPITIVANJE MOGUĆNOSTI SELEKTIVNOG IZDVAJANJA MINERALA IZ MINERALNE SIROVINE	253
7.1.1 Kriterijumi izbora postupaka selektivnog izdvajanja minerala	253
7.1.2 Mogućnosti izdvajanja minerala iz mineralne sirovine	254
7.1.3 Frakcionisanje sirovine na osnovu gustina minerala	256
7.1.4 Gustina	256
7.1.5 Merenje gustine staklenim piknometrom	256
7.1.6 Određivanje gustine tečnosti mohr-ovom vagom	258
7.1.7 Određivanje gustine teških tečnosti i suspenzija areometrom	258
7.1.8 Određivanje gustine beckman-ovim vazdušnim piknometrom	258
7.1.9 Određivanje gustine volumetrijskim postupkom (zapreminska masa)	259
7.1.10 Određivanje gustine čvrstih tela hidrostatičkom vagom (zapreminska masa)	259
7.1.11 Određivanje zapreminske mase (prividne gustine)	260
7.1.12 Određivanje nasipne mase	261
7.1.13 Određivanje gustine tečnosti pomoću spojenih sudova (hidrometra)	261
7.1.14 Određivanje gustine volumetrom sa živom	261
7.2 RASLOJAVANJE MINERALNE SIROVINE NA FRAKCIJE ODREĐENIH GUSTINA (PLIVA-TONE ANALIZA)	262
7.2.1 Teške tečnosti	262
7.2.2 Organske teške tečnosti	263
7.2.3 Grupa neorganskih teških tečnosti	265
7.2.4 Reciklaža teških tečnosti	265
7.2.5 Izdvajanje minerala pri vrlo visokim gustinama	266
7.2.6 Tok izvođenja pliva-tone analize	266
7.2.7 Pribor za izvođenje pliva-tone analize	267
7.2.8 Frakcionisanje u teškim tečnostima pomoću centrifuge	268
7.2.9 Raslojavanje zrna centrifugom	270
7.2.10 Hidraulički metodi razdvajanja minerala	270
7.2.11 Holtenov sto - superpaner	271
7.2.12 Mikropaner (L. D. Muller)	271
7.2.13 Pliva-tone analiza uglja	275
7.2.14 Čišćenje uglja	277
7.2.15 Krive čišćenja uglja po Henry-Reinhardt-u	279
7.2.16 Prikazivanje rezultata pliva-tone analize po Mayer-u	282
7.2.17 Pliva-tone analiza sirovina metalčnih minerala po postupku Mayer-a	284
7.3 LITERATURA	285

GLAVA 7

7.1 ISPITIVANJE MOGUĆNOSTI SELEKTIVNOG IZDVAJANJA MINERALA IZ MINERALNE SIROVINE

7.1.1 KRITERIJUMI IZBORA POSTUPAKA SELEKTIVNOG IZDVAJANJA MINERALA

Jedan od najvažnijih zadataka metoda ispitivanja mineralnih sirovina, pored identifikacije i karakterizacije minerala, je oslobađanje minerala konstituenata sirovine i na kraju, kao najvažnije, njihovo izdvajanje u monomineralne frakcije. Kako bi ove kvalitativne i kvantitativne analize na sirovini što uspješnije izveli neophodno je, predhodno, *da odredimo osnovne fizičke veličine na sirovini odnosno mineralima.*

Ako je mineralna sirovina dovoljno usitnjena - otvorena (korisni minerali su oslobođeni od pratećih minerala jalovine), tada je treba razvrstati (razdeliti) na dva ili više proizvoda u kojima će sadržaj korisne komponente biti značajno različit.

Karakteristike minerala, koji čine mineralnu sirovinu, kao i njihove razlike (njihova vrednost, prerada i primena) uslovljavaju postupke njihovog međusobnog razdvajanja u monomineralne frakcije, tokom laboratorijskih ispitivanja i metode koncentracije u industrijskim procesima.

Na slici 7.1 je prikazan porast troškova koncentracije zavisno od primenjenih postupaka, uslovljenih vrstom i karakteristikama sirovine kao i osobenostima minerala u njoj.

Pri razdvajanju, selektivnom izdvajanju, korisnih minerala od pratećih minerala jalovine u procesima PMS koristimo se razlikama u:

- ♦ fizičkim osobinama minerala (mineralne sirovine): oblik, boja, gustina, magnetičnost, radioaktivnost;
- ♦ fizičkim osobinama površina minerala: elektroprovodnost na površini, kvašljivost, adsorpcija, triboelektrični efekti i dr.;
- ♦ hemijskim svojstvima minerala: rastvorljivost, promena hemijskog sastava pod uticajem temperature i dr.

Uspješnost i selektivnost svakog od postupaka izdvajanja je različita i zavisi od vrste mineralne sirovine na koju se postupak primenjuje. Srasla zrna minerala, prisutna u usitnjenoj sirovini, reaguju više ili manje uspješno na dati postupak selektivnog izdvajanja. Na primer, sraslo zrno sastavljeno od galenita i kvarca, koje će imati gustinu između kvarca i galenita (zavisno od procentualnog udela ovih faza u sraslom zrnu) će se u tehnološkom procesu, nekom od gravitacijskih postupaka, koncentrisati ili u jalovinu, što će prouzrokovati gubitak metala, ili u koncentrat galenita, čime će sniziti sadržaj metala (odnosno smanjiti iskorišćenje) u tom proizvodu. U flotacijskoj koncentraciji takvo zrno će relativno teže flotirati u poređenju sa slobodnim zrnom galenita, posebno ako je galenit "blokirao" u kvarcu, jer će tada pri flotaciji takvo zrno otići u jalovinu i predstavljati gubitak ovoga metala.

Ukoliko je sraslac sastavljen od galenita i sfalerita, tada takvo zrno može, u postupku flotacije, dospeti u koncentrat galenita ili u koncentrat sfalerita. Iz tih razloga se danas prilikom tehnološkog tretmana sirovine izdvajaju - predkoncentrati sraslih zrna korisnih minerala (kolektivni koncentrat), koji se zatim šalju na dodatno usitnjavanje, na domeljavanje, sa ciljem da se pojedinačna zrna odnosno minerali više oslobode kako bi se u daljem postupku mogli selektivno koncentrisati. Ovaj postupak PMS omogućuje ekonomičnije mlevenje, jer se iz daljeg procesa uklanja značajna masa jalovine (često i preko 90 %), a samo preostali deo sirovine - predkoncentrat se dalje tretira u procesu. Nakon domeljavanja predkoncentrata, do potrebnog stepena oslobađanja minerala, selektivnom flotacijom se izdvajaju odgovarajući samostalni proizvodi - koncentrati.

Izbor postupka razdvajanja minerala i izdvajanja monomineralnih frakcija, za neku mineralnu sirovinu, zavisi od niza kriterijuma. Tako imamo:

KRITERIJUM TEKSTURA I STRUKTURA

Mineralne sirovine se mogu pojavljivati kao masivne (ugalj, većina nemetalčnih mineralnih sirovina), kao kompleksna polimineralna ruda (uglavnom rudni metalni minerali), ili kao retke i sitne impregnacije u jalo-vim stenskim masama (ruda Cu, Au, Sn). Danas se mi-neralne sirovine najčešće javljaju kao složene smeše ili kao sitnozrne i siromašne mineralizacije u stenskoj ma-si. Kriterijum tekstura je osnovni kriterijum pri izboru finoće mlevenja odnosno stepena oslobađanja minerala (d_{80} - stepena otvorenosti). Svakako, da pri ovome, treba imati u vidu i optimalnu krupnoću zrna mineralne siro-vine, koja je uslovljena određenim postupcima konce-ntracije (vidi sliku 7.1.).

KRITERIJUM SADRŽAJA KORISNIH KOM-PONENATA - uglavnom vezan za sirovine sa siromaš-nom i sitnozrnatom mineralizacijom u vidu impregnacija. Izbor postupka PMS bitno je određen ovim kriteriju-mom.

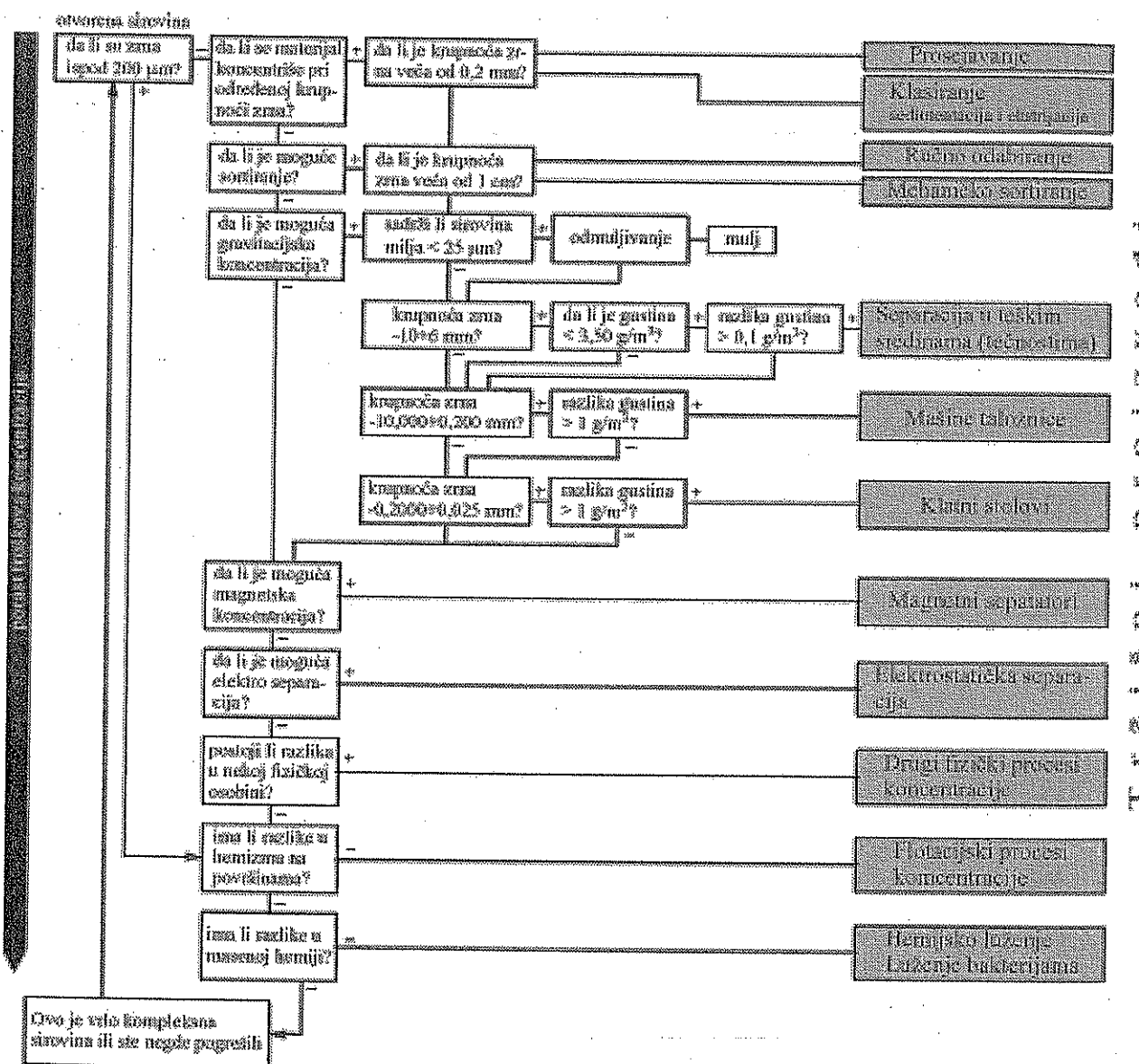
KRITERIJUM MINERALNOG SASTAVA - sa-gledava složenost asocijacije minerala i u većini sluča-jeva određuje postupak tehnološkog tretmana i bitno utiče na finoću mlevenja (d_{80}).

KRITERIJUM EKONOMIČNOSTI - uslovljava i utiče na izbor postupka PMS, izbor mašina i uređaja za PMS i određuje celokupnu tehnološku šemu prerade.

FIZIKO-HEMIJSKI KRITERIJUMI - suštinski utiču i određuju izbor postupaka PMS (ovi kriterijumi dati su u narednoj tablici 7.1.).

7.1.2 MOGUĆNOSTI IZDVAJANJA MINE-RALA IZ MINERALNE SIROVINE

Jedini način da se dva minerala u smeši mogu razdvojiti (odnosno izdvojiti jedan iz smeše) jeste da se koristimo razlikama u njihovim osobinama. Mogućnost razli-kovanja (a prema tome i izdvajanja) minerala na os-



Sl.7.1 Izbor postupka koncentracije (ili izdvajanje monomineralnih frakcija) u funkciji porasta troškova za usitnjavanje, odnosno za oslobađanje minerala

Tablica 7.1 Fizičko-hemijski kriterijumi selektivnog izdvajanja minerala

Kriterijum	Osobine minerala	Izdvajanje minerala na osnovu
Fizičko-hemijske osobine površina minerala	Elektro otpornost na površini, kvašljivost, adsorpcija, triboelektrični efekti	Odbijanje ili privlačenje u elektrostatičkom polju, fiksiranje hidrofobnih minerala za mehurić vazduha-flotacija
Fizičke osobine minerala	Gustina, oblik, boja, radioaktivnost, magnetičnost, elektroprovodnost	Brzina sedimentacije, sila trenja, ručno odabiranje, fluorescencija, privlačenje ili odbijanje u magnetnom polju, stepen refleksije svetlosti
Hemijske osobine minerala	Rastvorljivost, termičke promene	Rastvaranjem minerala kiselinama, obaranje, elektroliza ili izmena jona, prženje: oksidaciono, redukciono,

Tablica 7.2 Karakteristike minerala relevantne za selektivno izdvajanje monomineralnih frakcija

Osobine minerala	Jedinice	Karakteristični rasponi	Minimalno potrebna razlika
1. Gustina minerala	kg/m ³ g/cm ³ (t/m ³)	1400–22000	100–200 za gustine <3500 1000–3000 za gustine >3500 kg/m ³
2. Magnetski susceptibilitet (osetljivost)		1–1000	Oko 100
3. Elektroprovodnost površinska	Simes/m ²	10 ⁻⁶ –10 ⁻¹²	Oko 10 ⁻³
4. Tvrdina (Mosova skala)		1–10	
5. Količina reflektovanog svetla	%	5–80	15
6. Radioaktivnost	mc/kg	10–10000	Oko 1000
7. Kvašljivost u vodi	Ugao stepeni	0–120	Oko 60
8. Koeficijent širenja	K ⁻¹	1–60	Retko se primenjuje
9. Dielektrična konstanta		1–50	
10. Termička provodljivost	J/m K s	1–1500	Oko 1000
11. Boja	Sve boje		Male razlike
12. Hemijska reaktivnost		Promenljiva	

novu bilo kog kriterijuma postaje sve teže što te razlike u osobinama postaju manje. S druge strane, za kriterijume na osnovu kojih je moguće izdvajati monomineralne frakcije, jasno je, da što su razlike merljivih osobina veće, lakše se može izvesti izdvajanje minerala.

U tablici 7.2 su dati numerički podaci nekih merljivih osobina minerala kao i njihove minimalne vrednosti pri kojima postupak izdvajanja minerala u monomineralne frakcije, može biti zadovoljavajući.

Tako možemo ispitati mogućnost selektivnog izdvajanja minerala iz sirovine na osnovu razlika u gustini. U tablici 7.3 prikazani su neki minerali sa njihovim prosečnim gustinama i mogućnost njihovog razdvajanja u teškim tečnostima (isto je moguće postići i u suspenzijama odgovarajućih gustina). U laboratorijskim uslovima je takođe moguće izdvajanje minerala iz sirovine i na osnovu magnetskih osobina minerala konstituenata sirovine. U tablici 7.4 je prikazana magnetska osetljivost (magnetski susceptibilitet) nekih minerala po Devisu. Podele minerala na osnovu njihovih magnetskih osobina moguće je izvršiti i na druge načine, kao što su: tehnička klasifikacija, podela na osnovu obrazovanja unutrašnjeg magnetskog polja i dr.

Imajući na umu da većina ležišta mineralnih sirovina sadrži najčešće čitav niz vrlo različitih mineralnih vrsta (paragenetsku asocijaciju minerala), teško je prema tome i pretpostaviti da je moguće relativno lako i brzo, doći do zadovoljavajućeg izdvajanja (i razdvajanja) minerala, nekim laboratorijskim postupkom koncentracije i to samo jednom operacijom (ili jednim metodom), već je najčešće potreban čitav niz sukcesivnih procesnih postupaka.

Tablica 7.3 Gustine minerala i njihovo frakcionisanje

Tip minerala	Prosečna gustina, g/cm ³	Teške tečnosti za razdvajanje
Glaukonit	2,30	Bromoform
Gips	2,31	
Kvarc	2,65	
Kalcit	2,71	
Hlorit	2,79	
Dolomit	2,85	
Feldspat	2,85	Tetrabrometan
Muskovit	2,88	
Biotit	2,90	
Magnezit	2,95	
Fluorit	3,13	Metilen jodid
Andaluzit	3,20	
Apatit	3,21	
Kijanit	3,65	Tečnost Kleriči
Olivin	3,75	
Limonit	3,80	
Siderit	3,80	
Granati	3,90	
Korund	4,00	
Sfalerit	4,05	
Rutil	4,20	
Barit	4,50	
Pirotin	4,53	
Hromit	4,65	
Ilmenit	4,75	
Piroluzit	4,80	
Markasit	4,90	
Pirit	5,00	Elementarna živa
Hematit	5,10	
Magnetit	5,18	
Kasiterit	6,95	
Galenit	7,50	
Cinabarit	8,00	
Cu elementarni	8,90	
Ag elementarno	11,00	Elementarna živa
Au elementarno	19,00	
Platina	20,00	

Tablica 7.4 Magnetska osetljivost (magnetski susceptibilitet) nekih minerala po Davis-u

Minerali	Formula	Sila privlačenja po Davis-u	
Gvožd	Fe	100,00	Jako magnetični
Magnetit	Fe ₃ O ₄	40,18	
Franklinit	(Fe,Zn,Mn)O	35,38	
Ilmenit	FeTiO ₃	24,70	
Pirotin	FeS	6,69	
Biotit	K(Mg,Fe) ₃ x[AlSi ₃ O ₁₀] (OH,F) ₂	3,21	
Siderit	FeCO ₃	1,82	Slabo magnetični
Hematit	Fe ₂ O ₃	1,32	
Rodonit	MnSiO ₃	1,01	
Limonit	Fe ₂ O ₃ · H ₂ O	0,84	
Piroluzit	MnO ₂	0,71	
Kvarc	SiO ₂	0,37	Nemagnetični
Pirit	FeS ₂	0,23	
Kalcit	CaCO ₃	0,03	



7.1.3 FRAKCIONISANJE SIROVINE NA OSNOVU GUSTINA MINERALA

U daljem tekstu biće objašnjeni postupci određivanja gustina minerala, sirovine, teških tečnosti, suspenzija, prividne gustine, određivanje nasipne mase, zapreminske mase i druge karakteristike sirovine sa konačnim osvrtnom na laboratorijske postupke ispitivanja sirovine u cilju izdvajanja monomineralnih frakcija i utvrđivanja mogućnosti primene gravitacijske koncentracije minerala.

7.1.4 GUSTINA

Gustina ρ_m ili specifična masa definisana je količnikom mase m i zapremine V homogenog tela. Drugim rečima, gustina je brojno jednaka masi jedinice zapremine, odnosno specifična masa je definisana odnosom mase tela prema masi iste zapremine destilovane vode. Interesantno je napomenuti da se u mineralogiji gustina često uzima kao karakteristična konstanta bez označavanja jedinica mere.

Samim tim da nam pojedini komadi sirovine ili minerala, u odnosu na svoju veličinu, deluju u ruci lakšim ili težim, je od posebne pomoći pri određivanju šta bi oni mogli biti.

Isto tako minerali koji sadrže atome teških metala, kao što je Fe i ostali elementi posle njega u periodnom sistemu, prirodno je da će biti "teži".

Možda još karakterističnije, a što nam može biti od pomoći, je i veza između boje i gustine. Crni i tamno obojeni minerali su vrlo često relativno teži, dok su pak svetlo obojeni obično lakši. Svakako postoje i retki izuzeci kao što je na primer crni grafit sa gustinom 2,23 a koji očekujemo da bude težak ili pak beli barit čija je gustina 4,50 a neočekivano je težak uprkos boji.

Gustina je za pojedine mineralne vrste, određenog hemijskog sastava i strukture, konstantna. Oksidi i soli lakih metala imaju gustinu između 1 i 3,5 (gips - 2,3; kvarc - 2,65; kalcit - 2,70 itd.), izuzev barita koji ima gustinu 4,6. Jedinjenja teških metala imaju gustinu između 3,6 i 9 (sfalerit - 4,0; pirit - 5,0; ceruzit - 6,51; galenit - 7,5; cinabarit - 8,0 itd.). Najveću gustinu imaju samorodni minerali (bakar - 8,9; srebro - 11; zlato izme-

đu 15 i 19 itd.) i minerali iz platinske grupe sa gustinom između 14 i 20.

Gustina pojedinih minerala zavisi i od hemijskog sastava, odnosno od vrste atoma koji ulaze u sastav datog jedinjenja. Ovo može da se vidi iz sledećeg primera (Tablica 7.5):

Tablica 7.5 Gustina pojedinih minerala zavisno od hemijskog sastava, odnosno od vrste atoma koji ih grade

Mineral	Hemijski sastav	Atomska masa katjona	Gustina minerala
Aragonit	CaCO ₃	40,08	2,95
Stroncijanit	SrCO ₃	87,63	3,70
Barit	BaCO ₃	137,36	4,60
Ceruzit	PbCO ₃	207,21	6,55

Pomenuti minerali imaju isti tip kristalne rešetke, a različite gustine, odnosno, sa porastom atomske mase katjona raste i gustina datog jedinjenja. Na gustinu minerala ima uticaja takođe i veličina jonskog radijusa, kao i koordinacioni broj odnosno valentnost katjona.

7.1.5 MERENJE GUSTINE STAKLENIM PIKNOMETROM

Piknometar je staklena bočica tačno određene zapremine. Ona ima stakleni, brušeni čep kroz koji prolazi uzani kanal. Kada je zatvarač - čep u svom ležištu a piknometar napunjen nekom tečnošću do vrha kanala, onda on sadrži za datu temperaturu, tačno određenu zapreminu tečnosti. Određivanje zapremine piknometra vrši se merenjem mase destilovane vode, kojom se piknometar najpre napuni na pomenuti način.

Piknometrom se može odrediti gustina uzorka ako se isti nalazi u sprasnom odnosno sitnoznom stanju i da nije rastvorljiv u vodi ili drugoj tečnosti pomoću koje se vrši merenje (alkohol, bromoform, ugljentetrahlorid i dr.). Uzorak treba da bude srednji i reprezentativan, mase oko 10g. Izmeri se najpre masa usitnjenog materijala, piknometar se zatim napuni destilovanom vodom i izmeri njegova masa zajedno sa usitnjenim uzorkom pored njega. Isprazni se piknometar i u njega ubaci materi-

jal a zatim dopuni destilovanom vodom, zatvori i izmeri njegova masa.

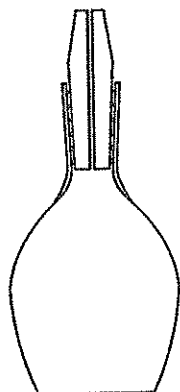
⚠ Napomene

✓ Obratiti pažnju da piknometar bude potpuno suv pri prvom merenju a pri daljim merenjima treba ga dobro spolja izbrisati. Sušenje piknometra se može vršiti zagrevanjem nad plamenom (ne direktno) pri skinutom zatvaraču.

✓ Prilikom dolivanja vode na usitnjeni materijal u piknometru, treba ga promućkati da bi se oslobodili mehurići vazduha koji se mogu nalaziti na uzorku.

✓ Zatvarač stavlja u vertikalnom položaju da ispod njega ne bi ostao mehur vazduha. Isto tako paziti da pri zatvaranju makar malo vode izađe kroz otvor na zatvaraču, kako bi se osiguralo njegovu punjenje do vrha kanala.

✓ Pri stavljanju zatvarača treba paziti da se na brušenom delu grlića ne nalaze zrna praha, jer u tom slučaju zatvarač ne naleže dobro a time se i zapremina menja.



Sl.7.2 Stakleni piknometar

Određivanje prave gustine ρ_m staklenim piknometrom izračunava se na osnovu

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \cdot \rho_f$$

gde su:

- m_1 - masa praznog piknometra,
- m_2 - masa piknometra sa uzorkom,
- m_3 - masa piknometra sa uzorkom i vodom,
- m_4 - masa piknometra sa vodom,
- ρ_f - gustina fluida.

Gustinu minerala ili mineralne sirovine možemo da izračunamo i prema sledećim podacima

$$\rho_m = \frac{m_m}{m_1 + m_m - m_2}$$

gde su:

- m_1 - masa piknometra sa vodom,
- m_2 - masa piknometra sa uzorkom i vodom,
- m_m - masa uzorka minerala ili sirovine.

Određivanje gustine teških tečnosti ρ_f staklenim piknometrom izračunava se prema

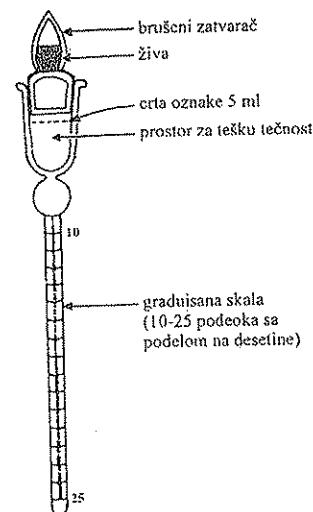
$$\rho_f = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot \rho_o$$

gde su:

- m_1 - masa praznog piknometra,
- m_2 - masa piknometra sa vodom,

- m_3 - masa piknometra sa teškom tečnošću,
- ρ_o - gustina vode.

Merenje gustine teških tečnosti moguće je izvesti i A.C. Tester-ovim (1931.) hidrometrom, jednom posebnom konstrukcijom staklenog piknometra. Određivanje gustine je veoma jednostavno i brzo, mada sam postupak ne daje rezultate sa visokom tačnošću. Hidrometar ima specijalnu konstrukciju i može biti baždaren za merenja u rasponu od 2,5 : 4,5 tako da praktično pokriva skoro sve teške tečnosti koje se koriste pri izvođenju pliva-tone analize odnosno frakcionisanju minerala. No i pored toga metod ima i svojih mana, kao što su: potrebna je relativno velika količina tečnosti (5 ml) za određivanje njene gustine; određivanje gustine ne može da se vrši u toku P-T analize, kao i to da je tačnost promeњljiva. Pri određivanju gustine u prostor za tešku tečnost se uspe tačno 5 ml tečnosti nepoznate gustine, a komora zatvori brušenim poklopcem u kome se nalazi živa. Zatvoreni hidrometar se tad okrene (zatvarač na dole) i pusti da pliva u menzuri napunjenoj destilovanom vodom. Sa graduisanog vrata hidrometra očitati vrednost koja podeljena sa pet daje gustinu nepoznate tečnosti. Konstrukcija hidrometra data je na slici 7.3.



Sl.7.3 Testerov hidrometar

Kada je reč o teškim tečnostima, pomoću kojih ćemo frakcionisati minerale prema njihovoj gustini, neophodno je odmah da skrenemo pažnju da nećemo imati uvek gustine koje su nam neophodne za određena izdavanja tih minerala. Tako ćemo datu gustinu pribavljenu od proizvođača često morati "razrediti", odnosno formirati potrebnu gustinu, a potom po obavljenim ispitivanjima biće takođe neophodno regenerisati razređene teške tečnosti, iz ekonomskih ali iz ekoloških razloga. U narednim obrascima biće prikazan postupak formiranja teške tečnosti tačno određene gustine, odnosno određivanje količine rastvarača koji treba dodati tečnosti poznate veće gustine od potrebne.

Formiranje teške tečnosti sa zadatom gustinom ρ

$$\rho = \frac{V_t \cdot \rho_t + V_r \cdot \rho_r}{V_t + V_r}$$

gde su:

- ρ - tražena gustina teške tečnosti,
- V_t - zapremina teške tečnosti,

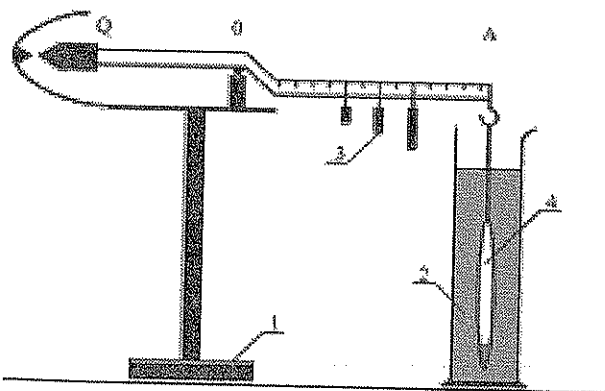
- V_r - zapremina rastvarača teške tečnosti,
 ρ_t - gustina teške tečnosti čija se gustina snižava,
 ρ_r - gustina rastvarača teške tečnosti.

Odakle je količina rastvarača V_r koja se dodaje teškoj tečnosti poznate gustine da bi se dobila zadata gustina tečnosti jednaka

$$V_r = V_t \cdot \frac{\rho_t - \rho}{\rho - \rho_r}$$

7.1.6 ODREĐIVANJE GUSTINE TEČNOSTI MOHR-OVOM VAGOM

Principom merenja potiska kod tečnosti, može se odrediti i njena gustina. Ovim postupkom određuje se gustina tečnosti prema poznatoj gustini tela sa kojim se meri potisak. Ovo se postiže vrlo precizno i jednostavno sa Mohr-ovom vagom (Sl.7.4). Poluga, čiji kraci ne moraju biti jednake dužine, ima ležište u tački O, slično poluzi kod vage. Na jednom kraju poluge obesi se telo P obično od stakla. Na drugom kraju poluge nalazi se teg Q, koji se, pomoću navrtanja, okretanjem može pomerati radi doterivanja u ravnotežno stanje. Najpre se telo P obesi u vazduhu i tegom Q podesi ravnoteža. Zatim se telo P potopi u destilovanu vodu. Usled potiska ravnoteža je narušena i da bi se ona ponovo uspostavila, potisak se kompenzuje tegom-jahačem, čija je masa tako odmerena da je ravna masi istisnute vode. Pošto je u pitanju potisak vode, masa ovog jahača brojno odgovara zapremini uronjenog tela P i obesi se o istu kukicu A o koji je okačeno i telo. Vaga će u ovom slučaju opet biti u ravnoteži. Sada se voda zameni teškom tečnošću čija se gustina određuje. Ako je ova tečnost manje gustine, zapremina istisnute tečnosti će ostati ista ali će potisak biti manji zbog manje gustine tečnosti. Ravnoteža se sada može postići ako se jahač postavi na manjem rastojanju od oslonca nego telo P, jer će na taj način jahač delovati manjim statičkim momentom. U tu svrhu je poluga podeljena u deset jednakih delova i svaka podela označena zarezom. Ako je gustina tečnosti 1-2 g/cm³, potreban je još jedan jahač iste mase. Da bi se ravnoteža mogla tačno uspostaviti i odrediti druga, treća i četvrta decimala gustine, uvode se još tri manja jahača čije mase iznose 1/10, 1/100 i 1/1000 od mase velikog jahača. Stavljanjem i ovih jahača u pomenute zareze može se potisak, a time i gustina, odrediti sa tačnošću od 0,0001.



Sl.7.4 Mohr-ova, odnosno Westphal-ova vaga. **Legenda:** Postolja vage; Menzura za tešku tečnost; Jahači-tegovi; Stakleno telo uronjeno u tečnost

Postupak i čitanje je ovde prosto. Kada je ravnoteža uspostavljena postavljanjem jahača u zareze, čitanje se vrši na sledeći način. Kada je gustina teške tečnosti veća od jedinice, jedan od velikih jahača je obešen na mestu gde i telo P, i daje prvu cifru gustine tj. celu jedinicu. Položaj drugog velikog jahača određuje prvu decimalu gustine. Položaj malog jahača, mase 1/10, određuje drugu decimalu, jahač 1/100 treću a jahač 1/1000 četvrtu decimalu gustine ispitivane tečnosti. Ako je gustina tečnosti manja od jedan prvi veliki jahač u tački A otpada, prva cifra celih je 0, dok sve ostalo ostaje isto.

Δ Napomene

✓ Telo P treba pri merenju da bude potpuno potopljeno u tečnost. Zbog površinskog napona, gornja ivica tela treba da je bar 1cm ispod površine tečnosti.

✓ Kod preciznih merenja telo P, posle proveravanja sa vodom, treba osušiti pre nego što se potopi u ispitivanu tečnost.

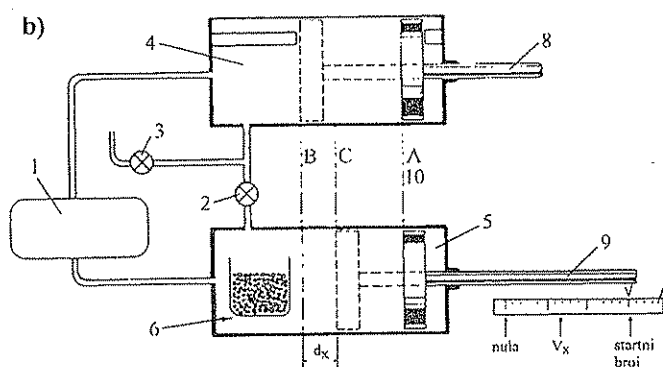
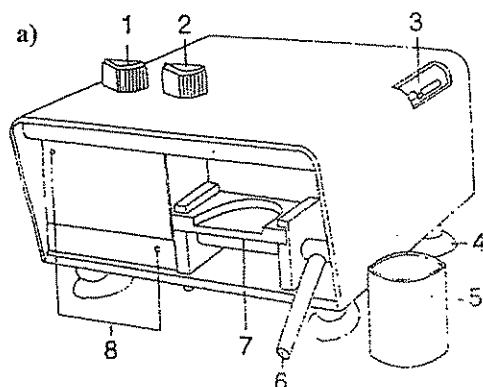
7.1.7 ODREĐIVANJE GUSTINE TEŠKIH TEČNOSTI I SUSPENZIJA AREOMETROM

Određivanje gustina teških tečnosti kao i gustina suspenzija odnosno teških sredina može da se vrši i areometrom - hidrometrom, jednostavnim potapanjem i očitavanjem vrednosti. Areometri su baždareni za različite gustine, a rad sa njima je ranije opisan u poglavlju o klasiranju sitnih zrna. Pogledati poglavlje koje obrađuje ovu materiju.

7.1.8 ODREĐIVANJE GUSTINE BECKMAN-OVIM VAZDUŠNIM PIKNOMETROM

Određivanje gustine Beckman-ovim vazdušnim uporednim piknometrom tipa M 930 vrši se merenjem zapremine sprasanih, granuliranih, poroznih i krajnje nepravilnih zrna ili komada sirovine. Uzorak ne mora da se kvasi, a može biti i krupnokomadašt. Tačnost merenja zapremine je veća od 0,1 cm³, a može da se postigne tačnost i do 0,05 cm³. Zapremina suda za uzorak čija se gustina određuje, iznosi 50 cm³.

Princip rada Beckman-ovog piknometra. Vazdušni piknometar se sastoji od dve komore i dva klipa - referentnog i mernog, kako je prikazano na slici 7.5. Dva cilindra, odnosno komore, su iste zapremine ukoliko su bez uzorka. Pri zatvorenom spojnom ventilu (pošto su ova dva cilindra međusobno spojena) svaka promena položaja klipa mora da se duplira identičnim hodom drugog klipa radi održavanja identičnog pritiska sa svake strane manometra koji registruje diferencijalni pritisak. Ako je spojni ventil zatvoren i oba klipa se pomere porednako do položaja B, i sa uzorkom zapremine V_x koji se nalazi u nosaču uzorka ubačenim u komoru B, pritisci neće ostati isti međutim, pritisci u obema komorama mogu biti izjednačeni povlačenjem klipa B - merni klip, iz položaja B u položaj C što je u stvari ekvivalentna zapremina V_x . Ako se klip A - referentni klip, uvek postavi na potpuno isto rastojanje kad god se vrši merenje (startni broj, karakterističan za svaki instrument) rastojanje za koje se klip B, mernom ručicom pomeri od položaja B kada su pritisci u oba cilindra isti, biće uvek proporcionalan zapremini V_x .



Sl.7.5 Beckman-ov vazdušni piknometar. Legenda: a. izgled piknometra; 1-spojni ventil; 2-spoljni ventil; 3-skala indikatora pod pritiska; 4-vakuum nožice uređaja; 5-posuda za uzorak; 6-ručica zatvarača; 7-ploča nosač posude za uzorak; 8-oznaka uređaja; b. delovi i funkcionisanje uređaja; 1-indikator diferencijalnog pritiska (manometar); 2-spojni ventil; 3-spoljni ventil; 4-cilindar A sa referentnim-etalonским klipom; 5-cilindar B sa merim klipom; 6-posuda za uzorak; 7-digitalni brojač sa startnim brojem za očitavanje zapremine; 8-referentni klip; 9-meri klip; 10-početni položaj A, nulti položaj C, merena zapremina B.

Rastojanje između položaja B i C (d_x) se može kalibrirati i podesiti da očitavanja budu neposredno u kubnim santimetrima. Očitavanje se vrši na brojaču direktno u kubnim centimetrima.

Beckman-ovim vazdušnim piknometrom mogu se meriti gustine sprasjenih uzoraka ili komada određujući njihovu zapreminu. Ukoliko je zapremina uzoraka izmerena sa zahvaćenim porama (tako što se komadi prethodno potope u rastopljeni parafin ili vosak i ohlade) dobija se prividna gustina odnosno zapreminska masa.

7.1.9 ODREĐIVANJE GUSTINE VOLUMETRIJSKIM POSTUPKOM (ZAPREMINSKA MASA)

Određivanje gustine volumetrijskim putem zasniva se na određivanju zapremine vode koju istiskuju komadi poznate mase uranjanjem u vodu. Najjednostavniji je način da se u menzuru sipa tečnost do određenog nivoa a zatim spuste komadi poznate mase i očitava nivo izdignute tečnosti. Iz dobijenih podataka izračunava se gustina $\rho_m = m/V$, gde je m -masa komada u vazdušno-suvom stanju a V -zapremina komada, odnosno, količina istisnute tečnosti. Na ovaj način može da se određuje gustina kompaktnih minerala ili stena bez pora i pukotina, zatim onih koji se ne rastvaraju u tečnosti.

Relativna gustina se dobija iz odnosa mase uzorka prema masi iste zapremine vode odnosno zapremini uzorka (sa porama, šuplinama, inkluzijama).

$$\rho_v = \frac{m}{V_2 - V_1}$$

gde su:

- m - masa komada u vazduhu,
- V_1, V_2 - razlika zapremina pre i posle potapanja komada u menzuru, što predstavlja zapreminu komada.

7.1.10 ODREĐIVANJE GUSTINE ČVRSTIH TELA HIDROSTATIČOM VAGOM (ZAPREMINSKA MASA)

Na tela potopljena u neku tečnost deluje potisak koji ima suprotni smer dejstvu gravitacije. Prema Arhimedo-

vom načelu ovaj potisak je ravan masi telom istisnute tečnosti. Zapremina istisnute tečnosti je jednaka zapremini tela ma kakvog oblika ono bilo. Ove činjenice pružaju mogućnost da se zapremina tela nepravilnih oblika (komadi sirovine, minerala) odredi pomoću merenja potiska odnosno merenja mase. Za određivanje gustine potrebno je pored mase tela poznavati i njegovu zapreminu, te potisak tečnosti predstavlja najpogodniji način za direktno određivanje zapremine nepravilnih tela.

Vaga na čijoj jednoj strani je okačeno telo tako da se njegova masa može meriti i u vazduhu i u nekoj tečnosti zove se hidrostatička vaga. Postoji više tipova konstrukcije hidrostatičkih vaga (torziona vaga, Walker steelyard balance, Jolly spring balance, Westphal balance) (Sl. 7.6). Ovakvim vagama se može odrediti gustina komada sirovine ili minerala ma kakvog nepravilnog oblika, pod uslovom da nije hidroskopska ili rastvorljiva u upotrebljenoj tečnosti. Komad čiju gustinu treba odrediti veže se lakim koncem o jedan krak vage i izmeri njegova masa u vazduhu. Nakon toga se ispod merenog komada postavi sud sa vodom tako da telo bude potpuno potopljeno u njoj i izmeri njegova masa u tečnosti. Razlika ovih masa daje potisak odnosno masu istisnute tečnosti (vode). Ako gustinu vode označimo sa $\rho_0 = 1 \text{ g/cm}^3$ onda izraz $(m_1 - m_2) / \rho_0$ daje zapreminu tela V .

$$\rho_z = \frac{m}{m - m_1} \cdot \rho_f$$

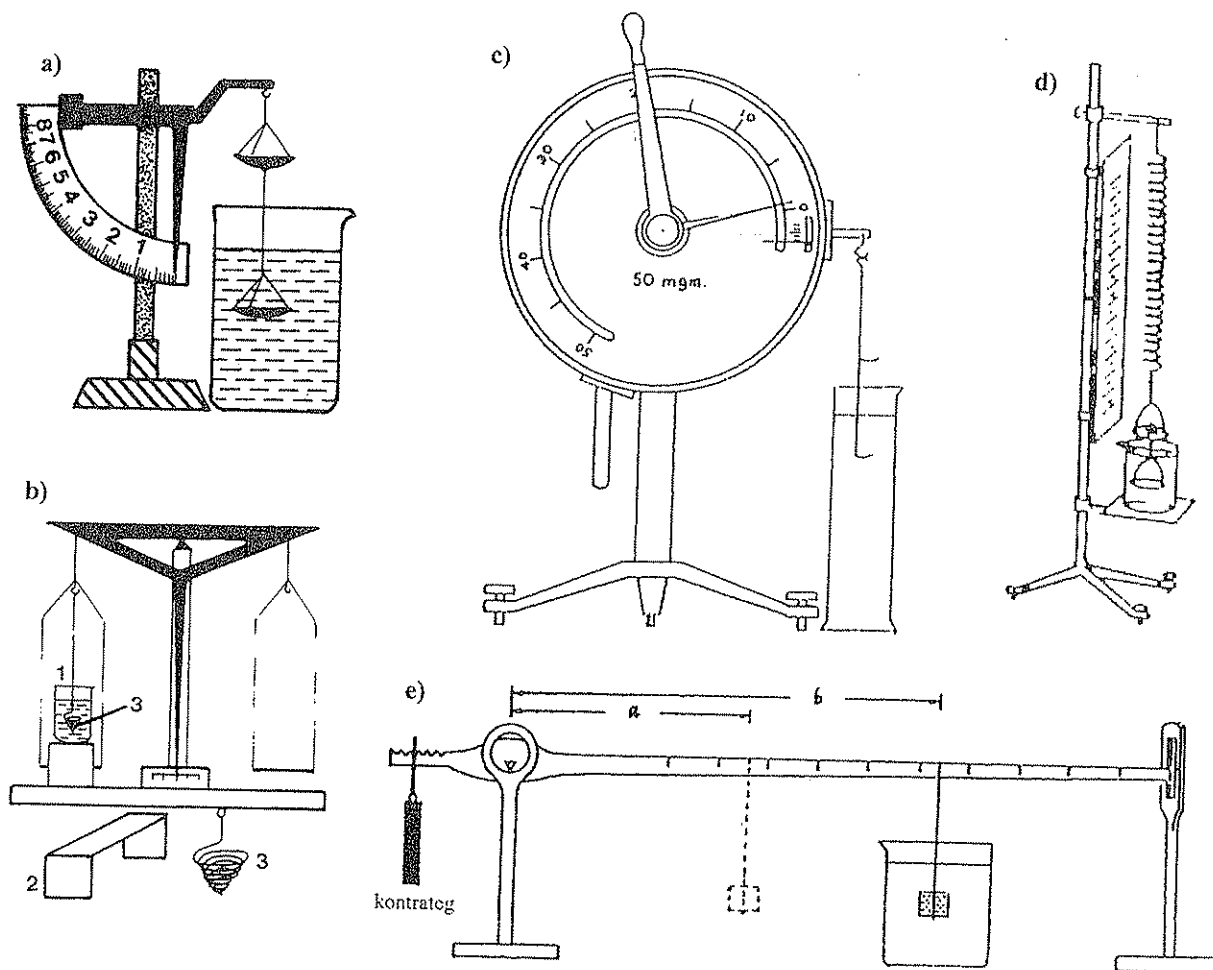
gde su:

- m - masa komada u vazduhu,
- m_1 - masa komada potopljen u tečnost,
- ρ_f - gustina tečnosti u kojoj se vrši potapanje.

⚠ Napomene

☑ Pri ovakvom određivanju gustine sirovina ne sme biti higroskopska niti rastvorljiva u vodi.

☑ Pri merenju u vazduhu uzorak mora biti suv a pri drugom merenju mora biti potpuno potopljen u vodi, tako da njegova gornja ivica bude bar 1cm ispod površine vode.



Sl.7.6 Hidrostatske vage različitih konstrukcija za određivanje gustine čvrstih tela. **Legenda:** a-Švarcova vaga; b-Analiitička vaga adaptirana kao hidrostatička vaga; c-Torziona vaga; d-Jolly-jeva vaga; e-Walker-ova vaga.

7.1.11 ODREĐIVANJE ZAPREMINSKE MASE (PRIVIDNE GUSTINE)

Određivanje prividne gustine (poroznog uzorka) vrši se na komadastoj ili krupnoznoj sirovini i to na srednjem reprezentativnom uzorku koji se predhodno izmeri u suvom stanju, zatim potopi u tečnost, drži do potpunog zasićenja (što se utvrđuje uzastopnim merenjima u određenim vremenskim intervalima do konstantne mase). Kada je uzorak zasićen tečnošću nakon otkapavanja i eventualnog uklanjanja upijanjem viška tečnosti sa površine komada meri se njegova masa, a zatim se tako zasićenim komadima određuje zapremina - volumetrijski. Iz dobijenih podataka izračunava se prividna gustina sirovine prema datom obrascu

Promena zapreminske mase usled upijanja tečnosti veoma je značajna za sirovine kao što su ugalj, magnezit, fosfati, limonitske rude i dr., pri ispitivanju mogućnosti gravitacijske koncentracije pliva-tone analizom u teškim tečnostima.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p}$$

gde su:

- ρ_p - prividna gustina
- m_p - masa uzorka
- V_p - zapremina uzorka.

Zamenom odgovarajućih podataka merenja u sledeću jednakost, možemo izračunati zapreminsku masu poroznih, higroskopskih uzoraka, prema

$$\rho_p = \frac{m_o}{V_n - (m_n - m_o)}$$

gde su:

- m_o - masa suvog uzorka,
- m_n - masa uzorka potopljenog u vodu do potpunog zasićenja,
- V_n - zapremina uzorka zasićenog vodom.

Sirovine koje su higroskopske (ugalj, boksit, fosfati, magnezit i td.) potapanjem u vodu ili tešku tečnost upijaju je, čime se menja njihova zapreminska masa. Koliko će vode ili teške tečnosti da upije sirovina zavisiće od veličine higroskopsnosti, kapilarnosti i granulometrijskog sastava.

Kod izvesnih sirovina zasićenje nastupa posle nekoliko minuta, a kod drugih posle više desetina minuta pa i časova. Dobijena zapreminska masa, sa tako zasićenom sirovinom, naziva se **prividnom gustinom**. Merenje gustine ovakvih sirovina vrši se na taj način što se komadi, predhodno osušeni, potapaju u rastopljeni parafin čime se na samoj površini stvara tanak film koji štiti od daljeg prodiranja tečnosti u otvorene pore. Masa i zapremina parafinskog filma mogu biti zanemarene te se gustina ovakvih komada može dalje izračunati iz odnosa mase i zapremine tela.

7.1.12 ODREĐIVANJE NASIPNE MASE

Nasipna masa je masa jedinice zapremine krupno komadaste do sitnozrne mineralne sirovine. Prema tome nasipna masa može da bude jedna vrsta zapreminske mase. Razlika je u tome što se pod zapreminom podrazumeva kod zapreminske mase - zapremina komada i zrna sa prirodnim porama i šupljinama u kojima se nalaze gasovi, a kod nasipne mase zapremina komada ili zrna sa zapreminom međuprostora. Određivanje nasipne mase je veoma jednostavno i često potrebno inženjerima PMS. Sud poznate zapremine i mase napuni se sirovinom i izmeri njegova masa. Iz dobijenih podataka izračunava se nasipna masa ρ_n prema obrascu

$$\rho_n = \frac{m_1 - m}{V}$$

gde su:

m_1 - masa suda i uzorka,

m - masa suda,

V - zapremina suda.

(Nasipna masa može da iznosi oko polovine vrednosti gustine, pri određenim krupnoćama, za jednu mineralnu sirovinu).

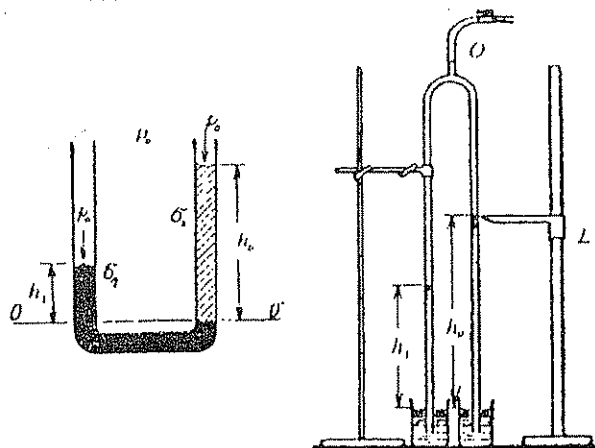
7.1.13 ODREĐIVANJE GUSTINE TEČNOSTI POMOĆU SPOJENIH SUDOVA (HIDROMETRA)

Pritisak je po definiciji jednak sili po jedinici normalne površine, pri čemu se hidrostatički pritisak može izraziti relacijom

$$p = \rho h$$

gde je:

p - pritisak, ρ - gustina tečnosti, h - visina stuba tečnosti.



Sl. 7.7 Određivanje gustine tečnosti pomoću spojenih sudova

Ako se dve tečnosti koje se ne mešaju stave u spojene sudove otvorene odozgo, onda će se one postaviti tako da pritisci stubova tečnosti u jednom i u drugom sudu budu u ravnoteži. (Sl. 7.7) Pošto isti atmosferski pritisak p_0 deluje na površinu tečnosti u oba suda, moći će se za granični nivo OO' izraziti ravnoteža na sledeći način

$$\rho_1 h_1 + p_0 = \rho_0 h_0 + p_0$$

odnosno

$$\rho_1 h_1 = \rho_0 h_0$$

ili

$$\rho_1 / \rho_0 = h_0 / h_1$$

što znači da visine stubova stoje u obrnutom odnosu gustina.

Ako je gustina jedne tečnosti poznata, iz gornje jednačine se može odrediti nepoznata gustina ρ_1 druge tečnosti

$$\rho_1 = \rho_0 h_0 / h_1$$

najpodesnije je da se za jednu tečnost uzme voda čija je gustina poznata te u tom slučaju nepoznatu gustinu određuje odnos h_0/h_1 .

Ovakav način određivanja gustine moguć je samo onda ako se tečnosti ne mešaju. Inače se upotrebljava uređaj koji se zove hidrometar kod koga ne postoji mogućnost mešanja tečnosti. Hidrometar se sastoji iz staklene U-cevi čiji su donji krajevi potopljeni u dva odvojena staklena suda. U jednom od njih je tečnost poznate gustine, obično voda a u drugom tečnost čija se gustina određuje. Ako se iz cevi izvuče nešto vazduha, i otvor zatvori, tečnost će se popeti u cevima i zauzeti ravnotežni položaj. Isti pritisak vazduha u cevi delovaće na obe površine tečnosti u cevima, dok će atmosferski pritisak delovati na površine tečnosti u oba suda. Pritisci u oba stuba tečnosti stajaće u ravnoteži a iz razlika u visinama izračunaće se nepoznata gustina. Tako će se nepoznata gustina tečnosti odrediti prostim merenjem visina stubova vertikalnim lenjirom-katetometrom sa nonijusom.

$$\rho_1 = \rho_0 h_0 / h_1$$

Napomena

☑ Unutrašnji zidovi cevi treba da budu najpre nakvašeni. Ovo se postiže na taj način što se tečnost najpre podigne do veće visine a zatim spusti.

☑ Kod svake tečnosti treba meriti zasebno razliku između gornjeg i donjeg nivoa, jer, uopšte uzev, tečnosti ne stoje u sudovima na istom nivou.

☑ Pri merenju gornjeg i donjeg nivoa ne pomerati lenjir sa svoga mesta.

☑ Paziti da se pri merenju tečnosti čije površine zauzimaju konkavan oblik uzima donja, a kod ostalih gornja površina meniska.

☑ Treba raditi uvek sa većim visinama stubova tečnosti radi manje relativne greške.

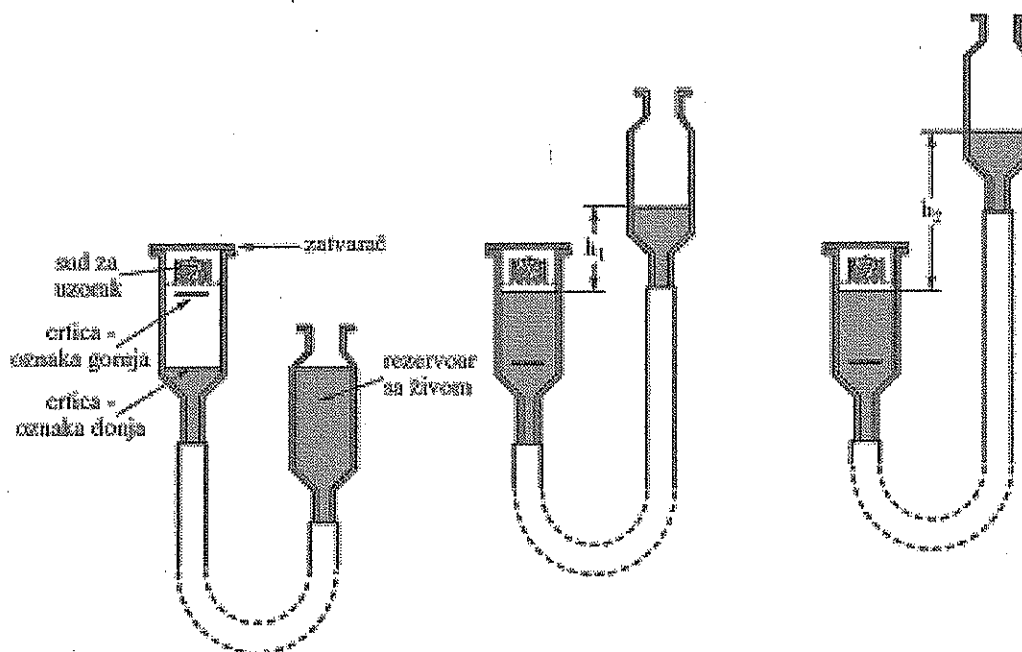
7.1.14 ODREĐIVANJE GUSTINE VOLUMOMETROM SA ŽIVOM

Korišćenje vazduha (ili gasova) kao medijuma pri merenju zapremine je prilično ograničeno zbog poteškoća pri preciznim merenjima veoma malih zapremina. Njegovo korišćenje je svakako opravdano u dva slučaja:

♦ Za rad sa fino samlevenim prahovima;

♦ Za sirovine (materijale) rastvorljive u korišćenom fluidu ili one koji reaguju sa njim.

Takođe je pogodno, na ovaj, način određivati gustinu vrlo poroznih materijala, ukoliko su im pore međusobno spojene i imaju veze sa površinom.



Sl.7.8 Određivanje gustine volumetrom sa živom

Ukoliko su pore izolovane, materijal svakako mora biti usitnjen kako bi se dobila stvarna zapremina materijala. Princip rada uređaja za volumetrijsko određivanje gustine dat je na narednoj slici (Sl. 7.8).

Zapremina vazduha v_1 , u komori za merenje je komprimovana na zapreminu v_2 , podizanjem nivoa tečnosti (žive) u komori sa nižeg nivoa na viši a prema označenim repnim crtama. Na ovaj način je određena visina h_1 (odnosno zapremina praznog suda u komori za merenje). Sada se, kada je uređaj izbaždaren, nivo tečnosti (žive) spusti na donju crtu, a odmerena količina uzorka, čija se gustina određuje, uspe u sud za merenje i ubaci u prostor komore. Komora se zatvori, a tečnost (živa) se ponovo dovede na gornju crtu i odredi ovoga puta visi-

na h_2 . Na taj način je određena zapremina v_3 . Na normalnom atmosferskom pritisku P (u mm živinog stuba) visina h_1 , h_2 izmerenih visinom živinog stuba u milimetrima, dobijamo $P_1 = P + h_1$ i $P_2 = P + h_2$. Tako imamo

$$P_1 v_2 = k = P_2 (v_2 - v_3)$$

$$P_1 v_2 = P_2 v_2 - P_2 v_3$$

$$P_2 v_3 = P_2 v_2 - P_1 v_2$$

$$v_3 = \frac{v_2 \cdot (P_2 - P_1)}{P_2}$$

Poznavanjem mase uzorka i na ovaj način određene zapremine možemo izračunati njegovu gustinu.

7.2 RASLOJAVANJE MINERALNE SIROVINE NA FRAKCIJE ODREĐENIH GUSTINA (PLIVA-TONE ANALIZA)

7.2.1 TEŠKE TEČNOSTI

Postoji veći broj teških tečnosti (organskih i neorganskih) koje se koriste za raslojavanje sirovina u frakcije određenih gustina. Sve tečnosti su u manjoj ili većoj meri toksične, zato treba opite izvoditi u prostoriji koja ima dobro provetravanje. U daljem tekstu biće prikazane najčešće korišćene teške tečnosti sa osnovnim podacima o gustini (maksimalne vrednosti koje obezbeđuje dati sastav) zatim vrste rastvarača za pojedine teške tečnosti radi snižavanja gustina kao i njihova reciklaža nakon upotrebe. Biće prikazani postupci raslojavanja mineralnih sirovina u različitim teškim tečnostima u gravitacionom polju i centrifugalnom polju.

Sve teške tečnosti mogu se generalno razvrstati u tri osnovne grupe:

□ U prvu grupu mogu se uvrstiti rastvori kalcijum hlorida, cink hlorida i etil jodid; gustine ovih tečnosti su manje od dva; a koriste se za raslojavanje uglja i drugih relativno lakih nemetaličnih minerala u cilju ispitivanja

moćnosti odstranjivanja minerala jalovine primenom gravitacijske koncentracije;

□ U drugu grupu mogu se uvrstiti teške tečnosti i njihove smeše, gustina od 2,80 do 3,32; ove teške tečnosti se koriste za selektivno izdvajanje teških minerala od pratećih minerala jalovine. Ova grupa ima najveću primenu kod ispitivanja ruda metala kao i nemetaličnih mineralnih sirovina;

□ U treću grupu mogu se svrstati teške tečnosti i njihove smeše gustina od 3,50 do 4,27; koriste se za produženo raslojavanje teške frakcije minerala dobijene frakcionisanjem u teškim tečnostima predhodne grupe.

Teške tečnosti su relativno skupe hemikalije, kao po pravilu cene su im u direktnom odnosu sa njihovom gustinom, pa stoga treba povesti računa kod izbora teških tečnosti i strogo se pridržavati redosleda raslojavanja. Primera radi ako uzmemo da najčešće korišćena tečnost bromoform ima relativnu cenu 1, tetrabrometan ima 0,7 a tečnost kleriči čak 12 (Tablica 7.6). Tako, treba prvo izdvojiti najlakše frakcije (koja kod većine ruda metala

iznosi oko 90%) a zatim iz tako bitno smanjene količine teške frakcije izdvajati srednje teške odnosno teške frakcije pri visokim gustinama teških tečnosti, ali bitno smanjenim količinama.

Raslojavanje sirovine u teškim tečnostima na frakcije određenih gustina omogućava:

□ Poznavanje sastava mineralne sirovine u pogledu odnosa zastupljenosti pojedinih mineralnih vrsta u monomineralnim zrnima i komadima, odnosno u sraslim zrnima, pri datoj krupnoći sirovine, što pruža uvid u mogućnost primene gravitacijske koncentracije;

□ Kontrolu oštine odvajanja definitivnih proizvoda u procesima gravitacijske koncentracije.

Raslojavanje sirovine u frakcije određenih gustina ima veliku primenu u naučno-istraživačkom radu, pri izučavanju:

□ Sastava složenih polimineralnih sirovina, da ukaže na prisustvo malo zastupljenih minerala u cilju njihove dalje identifikacije i karakterizacije;

□ Pri izučavanju fizičkih i fizičko-hemijskih karakteristika minerala;

□ Za ukazivanje na prisustvo minerala, u datim rudama, nosilaca retkih, rasejanih i plemenitih metala kao i njihovu raspodelu između minerala konstituenata sirovine, i

□ Za ispitivanje stepena oslobađanja minerala date sirovine pri određenoj finoći usitnjavanja.

7.2.2 ORGANSKE TEŠKE TEČNOSTI

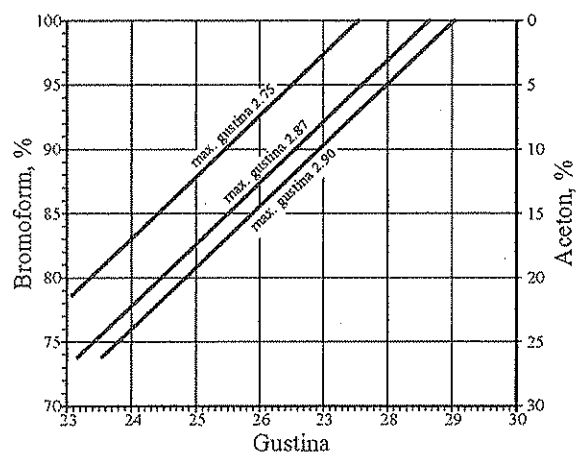
□ **Bromoform** CHBr_3 (tribrometan) gustine 2,89 g/cm^3 pri 20° C. Temperatura ključanja 151° C, zamrzavanja 7,8° C. Tečnost ne rastvara minerale. Nedostatak je što lako isparava. Bromoform se ne rastvara u vodi. Komercijalni bromoform obično ima nižu gustinu (oko 2,65 g/cm^3) zbog prisutnog razređenog alkohola. Međutim, čisti bromoform u toku dužeg stajanja može da pokaže težnju za razlaganjem, uprkos pravilnom skladištenju, dok je razređen alkoholom ili acetonom do otprilike gustine 2,75 g/cm^3 prilično stabilan. Bromoform se lako razređuje sa ugljentetrahloridom, benzenom, alkoholom i acetonom. Za dobijanje, pak, čistog bromoforma iz smeše bromoform + ugljentetrahlorid ili bromoform+benzen, neophodno je izvršiti redestilaciju, dok se on pak iz smeše sa alkoholom ili acetonom rekliše "pranjem" sa vodom koja se lako meša sa ova dva pomenuta razređivača. Prema tome, iz praktičnih razloga, najbolje je kao razređivač koristiti aceton ukoliko su potrebne gustine niže od maksimalnih, kao i pri ispiranju posuda. Grafik na Sl.7.9 pokazuje gustine razređenog bromoforma pri različitim odnosima acetona kao razređivača, za tri različite polazne gustine "čistog" bromoforma.

Možda je jedina mana kod korišćenja acetona, kao razređivača, ta što lako isparava čime se gustina teške tečnosti menja. U tom smislu se preporučuje rad u zatvorenim sudovima čime se ovaj efekat minimizira. Kao i kod svih drugih rad sa teškim tečnostima treba izvoditi u odvojenim i dobro ventiliranim prostorima (kapelama) kako nebi došlo do udisanja lako isparljivih para.

U ovu grupu organskih teških tečnosti možemo uvrstiti i sledeće:

- trihloreten C_2HCl_3 gustine $\rho=1,46 \text{ g/cm}^3$
- ugljentetrahlorid CCl_4 gustine $\rho=1,60 \text{ g/cm}^3$
- pentahloreten C_2HCl_5 gustine $\rho=1,68 \text{ g/cm}^3$
- dibrometan $\text{C}_2\text{H}_4\text{Br}_2$ gustine $\rho=2,17 \text{ g/cm}^3$

□ **Tetrabrometan** $\text{C}_2\text{H}_2\text{Br}_4$ (acetilen tetrabromid) gustine $\rho=2,96 \text{ g/cm}^3$ na 20° C. Viskozna, bezbojna tečnost, temperatura ključanja 137° C, temperatura zamrzavanja -20° C. Hemijski inertna tečnost. Tetrabrometan je nerastvoran u vodi zarazliku od bromoforma je menje isparljiv i ima veći viskozitet. Što znatno usporava frakcionisanje minerala pri P-T analizi. Lako se meša u svim odnosima sa acetonom, alkoholom, ugljentetrahloridom, benzenom i toluolom. Kao i bromoform i ugljentetrahlorid može biti recikliran iz smeše sa acetonom ili alkoholom "pranjem sa vodom". Komercijalni tetrabrometan obično ima nižu gustinu od ranije navedene i iznosi oko 2,80 g/cm^3 . Savetuje se da bi trebalo koristiti čist etil alkohol umesto metil alkohola kako za razređivanje tako i za ispiranje izdvojenih frakcija jer u suprotnom tetrabrometan će se zamutiti. Recikliranje iz smeše sa ugljentetrahloridom ili benzenom, vrši se frakcionom destilacijom ili samo jednostavnom evaporacijom.



Sl.7.9 Dijagram mešanja bromoforma i acetona pri 20° C.

□ **Metilenjodid** CH_2I_2 gustine 3,32 g/cm^3 , viskozna, svetložuta tečnost sa temperaturom ključanja 180° C, smrzavanja 5° C razlaže se u prisustvu minerala koji sadrže sumpor. Na svetlosti zatamnjuje usled izdvajanja joda. Tamni metilen jodid ima tada i manju gustinu, neprozračan je i postaje nepogodan za rad. Ne rastvara se u vodi. Rastvara se u ksilen (ksilolu).

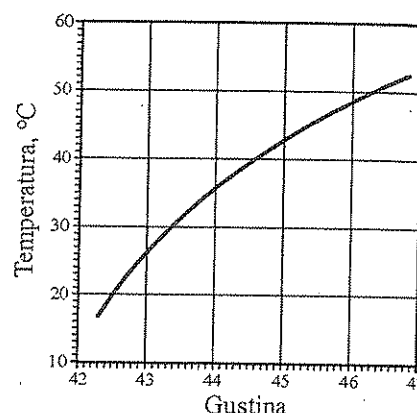
□ **Tečnost KLERIČI** je vodeni rastvor talijumove soli malonske kiseline $\text{CH}_2(\text{COOTl})_2$ ili $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_2\text{Ti}_2$ i talijumove soli mravlje kiseline HCOOTl ili HCO_2Ti gustine 4,25 g/cm^3 , vrlo viskozna, žuta tečnost, postojana, vrlo skupa i prilično deficitarna. Tečnost KLERIČI je, verovatno, jedna od najpogodnijih teških tečnosti za frakcionisanje minerala čije su gustine veće od 3,00 g/cm^3 . Ova tečnost, u normalnim uslovima, hemijski ne reaguje ni sa jednim mineralom. Mada se preporučuje da vreme neposrednog kontakta sa sulfidima treba da bude što kraće, a posebno ako je rastvor vreo. Tečnost je vrlo otrovna i ne bi smela doći u kontakt sa kožom, a posebno čuvati oči. Tečnost Kleriči se može nabaviti iz komercijalnih izvora potpuno gotova ili se može pripremiti.

- ♦ Destilovana voda 10 ml na 20° C
- ♦ Talijum formijat 100g (talijumova so mravlje kiseline)
- ♦ Talijum malonat 100g [talijumova so malonske kiseline; malonska kiselina $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$]

Pažljivo rastvoriti konstituente i na kraju profiltrirati rastvor. Pri višim temperaturama se mogu, u istoj količini rastvarača, rastvoriti veće količine ovih soli, (u istom odnosu) a tečnost će imati odgovarajuću veću gustinu, kao što je prikazano na Sl.7.10.

Pošto je tečnost Kleriči vrlo skupa (oko dvanaest puta je skuplja od iste količine bromoforma) sa njom se mora izuzetno ekonomisati. Ovu tešku tečnost koristiti isključivo posle potapanja i izdvajanja većeg dela uzorka sirovine, bilo u bromoformu, bilo ugljentetrahloridu. Uopšte, logično je očekivati da će tešku frakciju, gustine veće od $2,87 \text{ g/cm}^3$, činiti svega nekoliko procenata polaznog uzorka i zbog toga svako dalja razdvajanje teških minerala može se izvesti sa svega nekoliko mililitara tečnosti Kleriči.

Tečnost Kleriči se razređuje vodom. Organske teške tečnosti su hemijski relativno inertne, što je važna prednost u poređenju sa drugom grupom teških tečnosti neorganskog porekla - vodenih rastvora soli teških metala.



Sl. 7.10 Uticaj temperature na gustinu rastvora teške tečnosti Kleriči

Tablica 7.6 Sumarni pregled osnovnih karakteristika teških tečnosti koje se preporučuju za opštu upotrebu

Naziv teške tečnosti	Formula	Maksimalna gustina	Rastvarač	Reciklaža
Etil jodid	$\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$	1,94	Alkohol Benzol Etar	
Relativna cena	Upozorenje:			
Bromoform	CHBr_3	2,89	Aceton Alkohol Ugljen-tetrahlorid Benzen	"Pranje sa vodom", frakciona destilacija, ili spora evaporacija.
Relativna cena 1	Upozorenje: Čuvati na hladnom mestu, u tamnim bocama, lako isparava i ne udisati isparenja. Preporučuje se za rad.			
Tečnost Tuleit	$\text{HgI}_2 + \text{KI}$	3,20	Voda	
Relativna cena	Upozorenje:			
Metilen jodid	CH_2I_2	3,32	Alkohol Benzin Benzol etar, ksilol	"Pranje sa vodom",
Relativna cena	Upozorenje: Razlaže se u prisustvu minerala koji sadrže sumpor.			
Stani hlorid	SnCl_4	2,88	voda	
Relativna cena	Upozorenje:			
Tetrabrometan	$\text{C}_2\text{H}_2\text{Br}_4$	2,98	Aceton Alkohol Ugljen-tetrahlorid Benzen	"Pranje sa vodom", frakciona destilacija, ili spora evaporacija.
Relativna cena 0,7	Upozorenje: Sličan bromoformu, isparljiv, ne udisati isparenja. Preporučuje se za rad do gustine 2,98			
Tečnost Kleriči	$\text{HCOOI} + \text{CH}_2(\text{COOI})_2$	4,25 na 20°C	Voda	Uparavanjem
Relativna cena 12	Upozorenje: Vrlo skupa, vrlo otrovna, paziti da ne dođe u kontakt sa kožom i očima, ne udisati isparenja. Preporučuje se za rad preko 3,00			
Tečnost Sušin-Rorbah-a	$\text{BaI}_2 + \text{HgI}_2$	3,50	Voda Alkohol Benzol Etar	
Relativna cena	Upozorenje: tečnost reaguje sa metalima i sulfidima metala, što joj ograničava upotrebu.			
Tečnost Kleina	$2\text{Cd}(\text{OH})_2 \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{WO}_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	3,46		
Relativna cena 7	Upozorenje:			

7.2.3 GRUPA NEORGANSKIH TEŠKIH TEČNOSTI

□ **Tečnost Tulet**, rastvor dvojne soli $\text{HgI}_2 \cdot 2\text{KJ} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, gustine $3,20 \text{ g/cm}^3$. Tečnost je žute boje, lako se meša sa vodom u svim odnosima.

□ **Tečnost Sušin-Rorbaha**, rastvor dvojne soli $\text{HgI}_2 \cdot \text{BaJ}_2$, gustine $3,50 \text{ g/cm}^3$. Ova teška tečnost se može razređivati u kipućoj vodi. Tečnosti Tulet i Rorbah reaguju sa metalima i sulfidima metala što ograničava njihovu primenu.

□ **Tečnost Kleina**, gustine $3,30 \text{ g/cm}^3$, rastvara se sa vodom, a maksimalna gustina iznosi $3,46 \text{ g/cm}^3$ na 15°C . Sastava $2 \text{ Cd(OH)}_2 \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{WO}_4 \cdot 16 \text{ H}_2\text{O}$. Cena je sedam puta veća od iste količine bromoforma.

□ Sigurne i slabo toksične teške tečnosti **M-44** i **M-45** predstavljaju rastvore cinkjodida i barijumjodida, rastvor barijumjodida i kadmijumjodida a gustine su im $2,90 \text{ g/cm}^3$ a viskozitet $9 \cdot 10 \text{ Pas}$. Rastvaraju se vodom prema rezultatim koje daju ove teške tečnosti zamenjuju bromoform. Prema tome M-44 čini $\text{ZnJ}_2 + \text{BaJ}_2$ a M-45 čini $\text{BaJ}_2 + \text{CaJ}_2$.

□ **Vodeni rastvori neorganskih soli**. Pored nabrojanih teških tečnosti vrlo često se koriste i vodeni rastvori nekih soli. Tako imamo

Cink hlorid (ZnCl_2) sa gustinom $1,80 \text{ g/cm}^3$ (max. $2,07 \text{ g/cm}^3$).

Kalcijum hlorid CaCl_2 sa gustinom $1,35 \text{ g/cm}^3$ (max. $1,654 \text{ g/cm}^3$).

Jodoform sa metilen jodidom $\text{CHI}_3 \cdot \text{CH}_2\text{J}_2$. $\rho = 3,45 \text{ g/cm}^3$.

Živin jodid (HgJ_2) ili **kalijum jodid** (KJ_2) sa gustinama $3,196 \text{ g/cm}^3$.

♦ ♦ ♦

Teške tečnosti mogu da zamene, posebno u industrijskim procesima, vodene suspenzije sa prirodnim mineralima kao suspenzoidima:

- kvarcni pesak SiO_2 ($2,60 \text{ g/cm}^3$) max. $1,50 \text{ g/cm}^3$, tvrdina 7,00
- magnetit Fe_3O_4 ($4,90\text{--}5,20 \text{ g/cm}^3$) max $2,50 \text{ g/cm}^3$, tvrdina 5,50–6,00
- barit BaSO_4 ($4,10\text{--}4,50 \text{ g/cm}^3$) max $2,80 \text{ g/cm}^3$, tvrdina 2,50–3,50
- hematit Fe_2O_3 ($4,00\text{--}5,30 \text{ g/cm}^3$) max $3,0 \text{ g/cm}^3$, tvrdina 5,50–6,50
- arsenopirit FeAsS ($6,0 \text{ g/cm}^3$) max $2,8 \text{ g/cm}^3$, tvrdina 5,4–6,0
- pirotin FeS ($4,6 \text{ g/cm}^3$) max $2,3 \text{ g/cm}^3$, tvrdina 3,5–4,5
- pirit FeS_2 ($4,90\text{--}5,20 \text{ g/cm}^3$) max $3,00 \text{ g/cm}^3$, tvrdina 6,00–6,50
- piratne ogoreline ($4,50\text{--}5,00 \text{ g/cm}^3$) max $3,00 \text{ g/cm}^3$, tvrdina 6,00–6,50
- galenit PbS ($7,50 \text{ g/cm}^3$) max $3,30 \text{ g/cm}^3$, tvrdina 2,50–2,70
- ferosilicijum ($6,50\text{--}6,80 \text{ g/cm}^3$) max $3,20 \text{ g/cm}^3$, tvrdina 6,00–7,00

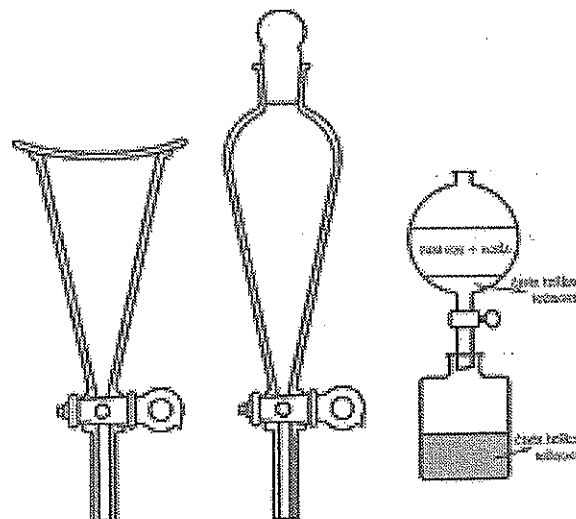
- mleveni ($85\% \text{ Fe}$, $15\% \text{ Si}$) ($6,90 \text{ g/cm}^3$) max $3,1 \text{ g/cm}^3$, tvrdina 7,0
- sferični ($85\% \text{ Fe}$, $15\% \text{ Si}$) ($6,9 \text{ g/cm}^3$) max $3,5\text{--}3,8$ tvrdina 7,3–7,6
- glina, max $1,490 \text{ g/cm}^3$
- les, max $1,550 \text{ g/cm}^3$

7.2.4 RECIKLAŽA TEŠKIH TEČNOSTI

Sve teške tečnosti koje se koriste za frakcionisanje minerala (selektivno izdvajanje minerala) su relativno skupe hemikalije a uz to su i potencijalno opasne (otrovna isparenja) te je zbog toga neophodno da se posle korišćenja one obavezno recikliraju. Rastvarači, koji se lako mešaju sa vodom, se iz teških tečnosti kao i pri ispitivanju izdvojenih frakcija minerala, uklanjaju "pranjem" u zatvorenim sudovima. U balon bocama se protresanjem, mućkanjem sa većom količinom destilovane vode vrši razdvajanje teške tečnosti od njenog rastvarača. Rastvarači, koji se lako mešaju sa vodom, odvajaju se i plivaju na potpuno čistoj teškoj tečnosti (koja se ne meša sa vodom).

Odvojena teška tečnost se ispušta otvaranjem ventila, na dnu suda za razdvajanje, u posebnu posudu kao prečišćenu, recikliranu tešku tečnost. Postupak se ponavlja više puta kako bi se izdvojila i najmanja količina zaostalog rastvarača. Pri ponovnom korišćenju reciklirane teške tečnosti obavezno je uvek proveriti njenu gustinu, koristeći se piknometrom ili standardnim kapsulama poznate gustine (koja će lebdeti u tečnosti ukoliko je njena gustina odgovarajuća).

Reciklaža razređenih teških tečnosti "pranjem" se uglavnom koristi za rastvarače lako rastvorljive u vodi.



Sl.7.11 Pribor za reciklažu rastvora teške tečnosti "pranjem"

Teške tečnosti razređene acetonom (propanom) takođe se mogu reciklirati "pranjem" destilovanom vodom na isti način kao i teške tečnosti razređene alkoholom ili destilacijom u kapeli sa dobrom ventilacijom odnosno postepenim isparavanjem. Predhodno ubačena kapsula standardne gustine će u trenutku postizanja odgovarajuće gustine lebdeti, odnosno kada sav rastvarač iz tečnosti bude uklonjen isparavanjem.

Razređena tečnost Kleriči se može uspešno reciklirati pažljivim uparavanjem (isparavanjem vode iz rastvora) iznad vodenog kupatila u dobro provetреноj kape- li; vodeći računa da ne dođe do pregrevanja teške tečno- sti jer će u suprotnom doći do stvaranja tamnomrkog os- tatka. Mnoge teške tečnosti potamnjuju pri višekratnom korišćenju i reciklaži. U većini slučajeva ova zatamnje- nja nemaju uticaja na postupak frakcionisanja sirovine u njima, osim što je otežano vizuelno praćenje procesa razdvajanja i njegovog okončanja. Tamna boja teške te- čnosti može se otkloniti dodatkom manje količine montmorilonitske gline uz dobro mućkanje u staklenoj boci ili pak zagrevanjem sa malom količinom drvenog uglja (ćumura). Montmorilonitska glina ili ćumur se mogu, po završetku ukloniti filtriranjem a zatim filtrat pažljivo odložimo.

7.2.5 IZDVAJANJE MINERALA PRI VRLO VISOKIM GUSTINAMA

Gustine fluida (teške tečnosti) pri kojim bi se selektivno izdvajali vrlo teški minerali, mogu biti ponekad pove- ćane, koristeći "specijalne" teške tečnosti ili teške sre- dine. Rukovanje ovim teškim tečnostima mora biti kra- jnje oprezno i pod kontrolom stručnog lica inače se nji- hova upotreba ne preporučuje.

□ Elementarna živa sa gustinom od $13,6 \text{ g/cm}^3$ spa- da u najteži tečni medijum i samo je nekoliko prirodnih elemenata odnosno minerala sa većom gustinom od ži- ve. Tako se "potapanjem" sirovine u živu može odvojiti većina minerala, a pri tome da ostanu elementarno zlato, srebro, platina i minerali njihovih legura. Separaciju u živu treba izvesti u vrlo kratkom vremenskom intervalu, kako ne bi došlo do amalgamacije (vezivanje plemenitih elemenata sa živom), a zatim izdvojene frakcije propustiti (filtrirati) kroz jelensku kožicu (ili divokoze). Ovaj postupak je posebno pogodan kod izdvajanja plemenitih metala posebno zlata i platinoidnih eleme- nata.

□ Suspenzija finih globula žive u tribrometanu CHBr_3 (bromoformu) omogućuje pravljenje gustina u rasponu od $3,00\text{--}7,00 \text{ g/cm}^3$. Ovakva suspenzija pored toksičnosti je inače vrlo teška za održavanje.

□ Tečni rastop cinkovog i olovnog hlorida (kotunit PbCl_2 , gustine $5,85 \text{ g/cm}^3$, tačke topljenja 501°C), koji se već pri nižim temperaturama može koristiti za selek- tivno izdvajanje minerala pri gustini rastopa od $6,00 \text{ g/cm}^3$. Nakon što je materijal odnosno sirovina frakcio- nisana, rastopljena smeša soli se ostavi da bi se ohladila i očvrsla. Očvrslu stub se prelomi na sredini te gornja i donja polovina odvojeno ubace u dva posebna suda sa vrelom vodom da bi se rastvorile očvrsele soli. Iz rastvo- ra se nakon toga, filtriranjem, izdvaja odgovarajuća fra- kcija minerala.

Dodatni detalji o načinu rada sa ovim nekonvencio- nalnim fluidima za selektivno izdvajanje minerala iz si- rovine možemo pronaći u stručnoj literaturi datoj na kraju ovog poglavlja.

△ Upućeni procesni mineralog mora uvek ozbiljno razmotriti pitanje opravdanosti primene ovih postupaka. Ako je frakcionisanje neophodno onda ga treba izvesti na najjednostavniji i najbezbedniji način.

7.2.6 TOK IZVOĐENJA PLIVA-TONE ANALIZE

Raslojavanje sirovine u frakcije rastućih gustina prak- tično je izvođenje pliva-tone analize, što u suštini predstavlja i uvid u oslobođenost komponenti u datoj si- rovinu. Za n - rastvora teške tečnosti dobijamo $n + 1$ proizvod. Treba takođe reći da je raslojavanje sirovine u frakcije rastućih gustina ograničeno do gustine teške tečnosti koju posedujemo (do najveće gustine tečnosti kojom raspolazemo). Plivajuća frakcija se izdvaja uvek kao definitivna, a tonuća frakcija kao ulaz za dalje ra- slojavanje pri većim gustinama.

Po zastupljenosti, frakcija lebdećih zrna, oznake ΔS , je po pravilu neznatna, i dužim stajanjem zrna u rastvo- ru teške tečnosti, ona se približavaju gornjem sloju (ΔL - frakcija) frakciji koja pliva, ili donjem sloju (ΔT - fra- kcija) frakciji koja tone. Tako da se unošenjem uzorka u rastvor neke teške tečnosti on se uvek, može se reći, fra- kcioniše na dva proizvoda ΔL i ΔT . Frakcija koja pliva se pažljivo prikupi, perforiranom kašikom, i stavlja na filter papir postavljen u levak gde će tečnost otkapati. Nakon toga u drugom sudu (istim levkom i filter papi- rom) vršimo ispiranje sirovine i suda razređivačem koji smo već koristili kod spravljanja rastvora teške tečnosti. Gotove proizvode sušimo, merimo i izračunavamo za- stupljenost.



Kod raslojavanja mineralne sirovine u teškim tečno- stima nije uvek reč samo o slobodnim zrnima, već što je mnogo češće treba frakcionisati srasla zrna, sa različitim odnosima mineralnih faza u njima. Svako sraslo zrno će imati gustinu koja će odgovarati srednjoj vrednosti gu- stina zastupljenih minerala u njemu. Prema tome, zavi- sno od udela, recimo jedne mineralne faze u sraslacu, biće određena i gustina frakcije pri kojoj će se takvo zr- no moći izdvojiti.

U tablici 7.7 su prikazana srasla zrna, počev od onih u kojima je udeo galenita nula, pa zatim srasla zrna sa sve većim udelom galenita u njima (porast od 10 % ma- senog udela) do konačno onih zrna, bez udela kvarca, odnosno 100 % galenita. Gustine ovakvih zrna imale bi vrednosti u rasponu od 2,60 kod kvarca do 7,50 kod ga- lenita, a između njih će biti devet frakcija sa različitim, rastućim, gustinama. Ova serija frakcija sraslih zrna raz- ličitih gustina može se prikazati i preko masenih odnosa konstituenata, kao što je dato u istoj tablici.

Raslojavanjem ovako prikazanih sraslih zrna pri odre- đenim graničnim vrednostima teške tečnosti u kojoj se sirovina frakcioniše, moguće je dobiti koncentrate različitog kvaliteta, kako je to ilustrativno prikazano u tablici 7.7. Počev od koncentrata K_1 sa isključivo slobodnim zrnima galenita (i teoretskom sadržaju Pb u njemu) preko K_2 , K_3 do K_{10} , čime je raslo iskorišćenje a opadao kvalitet u toj poslednjoj frakciji sraslih zrna, odnosno opadala količina korisnog minerala.

Ovakvom analizom može da se stekne uvid u mogu- ćnost primene određene metode koncentracije. Kako se gravitacijska koncentracija odvija u prisustvu sraslih zr- na a da bi smo utvrdili pri kojoj se gustini može dobiti koncentrat zadovoljavajućeg kvaliteta i visokog iskori- šćenja koristimo se takozvanom pliva-tone analizom.

Tablica 7.7 Varijacije odnosa masa složenih-sraslih zrna koja će se izdvajati na odgovarajućim gustinama pri P-T analizi, a. za galenit sa kvarcom, i b. za sfalerit sa kvarcom.

PbS, % + SiO ₂ , %	Gustina frakcije	Maseni odnos minerala u odnosu na kvarc	Kvalitet koncentrata
0 – 100	2,60	1,00	Jalovina
10 – 90	2,78	0,91	K ₁₀
20 – 80	2,99	0,83	K ₉
30 – 70	3,27	0,76	K ₈
40 – 60	3,52	0,68	K ₇
50 – 50	3,86	0,62	K ₆
60 – 40	4,28	0,56	K ₅
70 – 30	4,79	0,51	K ₄
80 – 20	5,45	0,45	K ₃
90 – 10	6,61	0,40	K ₂
100 – 0	7,50	0,35	K ₁ – teoretski sadržaj

ZnS, % + SiO ₂ , %	Gustina frakcije	Maseni odnos minerala u odnosu na kvarc	Kvalitet koncentrata
0 – 100	2,60	1,00	Jalovina
10 – 90	2,69	0,95	K ₁₀
20 – 80	2,80	0,90	K ₉
30 – 70	2,91	0,86	K ₈
40 – 60	3,02	0,82	K ₇
50 – 50	3,15	0,78	K ₆
60 – 40	3,29	0,74	K ₅
70 – 30	3,44	0,70	K ₄
80 – 20	3,61	0,67	K ₃
90 – 10	3,80	0,63	K ₂
100 – 0	4,00	0,60	K ₁ – teoretski sadržaj

7.2.7 PRIBOR ZA IZVOĐENJE PLIVA-TONE ANALIZE

Relativno male količine mineralne sirovine obično se raslojavaju - fracionišu potapanjem u teške tečnosti pri čemu koristimo pehare i staklene levkove.

U slučaju da se radi o većoj količini materijala, selektivno izdvajanje minerala, može da se izvede aparaturom čija je konstrukcija data na slici 7.13.

Postupak je kontinualnog, neprekidnog dejstva sa povratnom cirkulacijom teške tečnosti. Postepeno izdvajanje monomineralnih frakcija minerala izvodi se propuštanjem sirovine kroz tešku tečnost, odabrane gustine koju sipamo u levak, prikazan na slici 7.13.

U zavisnosti od krupnoće zrna, raslojavanje u teškim tečnostima izvoditi:

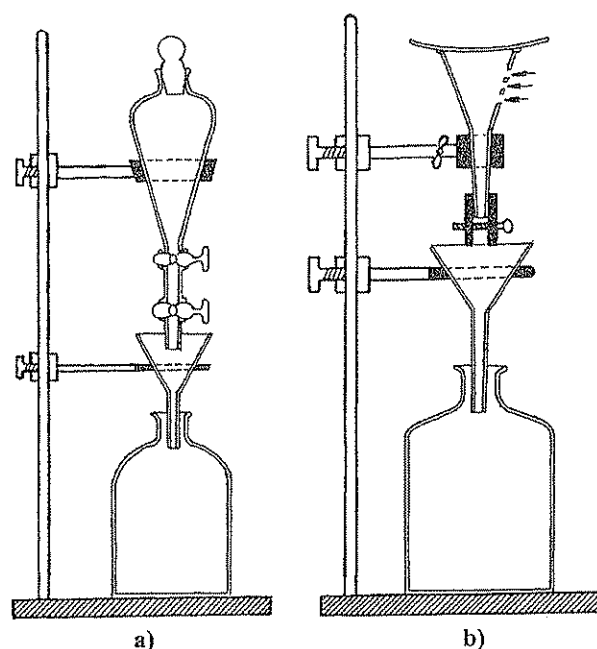
- ♦ za klase krupnoće preko 3 mm i komade sirovine u sudovima većih zapremina, čašama i peharima (metalične ili nemetalne mineralne sirovine, najčešće organskim teškim tečnostima; a ugljevi u ZnCl₂) (Sl.7.14);

- ♦ za zrna od 3 do 0,3 mm u levkovima i balonima (Sl.7.12);

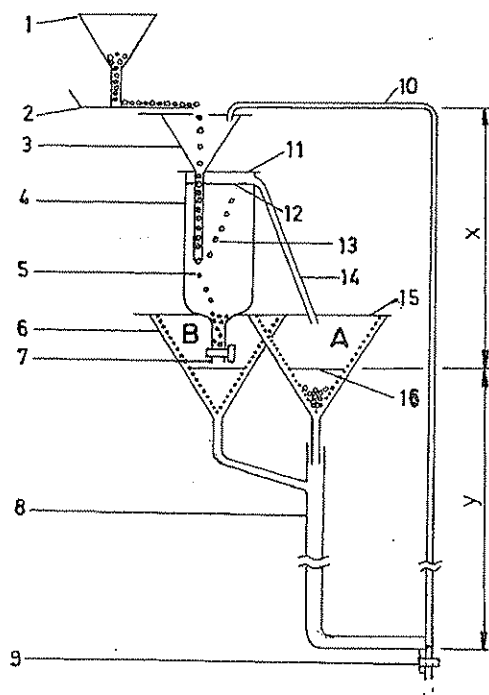
- ♦ za klase krupnoće ispod 0,3 mm u levkovima, peharima i kivetama uz centrifugiranje Sl.7.16).

Bitno je da sva zrna mineralne sirovine budu nakvašena, odnosno potopljena, teškom tečnošću, izvesno vreme kako bi moglo doći do odgovarajućeg raslojavanja na ona zrna koja plivaju i zrna koja tonu.

U postupku analize treba paziti da zrna ne ostanu prilepljena za zidove suda, pa se ona s vremena na vreme uklanjaju staklenim štapićem.



Sl. 7.12 A - Prikaz jednostavnog sklopa pribora za raslojavanje minerala uobičajenim teškim tečnostima, i B - pribor za rad sa tečnošću Kleriči



Sl. 7.13 Način izvođenja P-T analize kod uzoraka većih masa. **Legenda:** 1-levak-hranilica; 2-vibro dodavač; 3-kvašenje sirovine; 4-sud za raslojavanje; 5-teška frakcija; 6-levak za tešku frakciju; 7-ventil za ispuštanje; 8-odvod teške tečnosti; 9-ventil; 10-povraćaj teške tečnosti; 11-poklopac; 12-regulacija nivoa tečnosti; 13-laka frakcija; 14-odvod lake frakcije; 15-levak za laku frakciju; 16-filtriranje lake frakcije.

Brzina raslojavanja kojom će se zrna minerala razdvojiti zavisi od sledećih faktora:

- **Krupnoće zrna** (pokušajte da protresete, do pola napunjenu bocu sa šamponom, primetićete da se krupni mehuri vazduha zahvaćeni tečnošću, kreću ka površini brže od sitnijih mehurića. Ovaj primer, razume se, je potpuno suprotan procesu koji se odvija pri raslojavanju

mineralne sirovine sa relativno "teškim" mineralnim zrnima u tečnosti daleko manje gustine; ovde će, dakle, krupna zrna tonuti brže, dok istovremeno sitnijim zrnima nije potreban "ni minut" da stignu do dna).

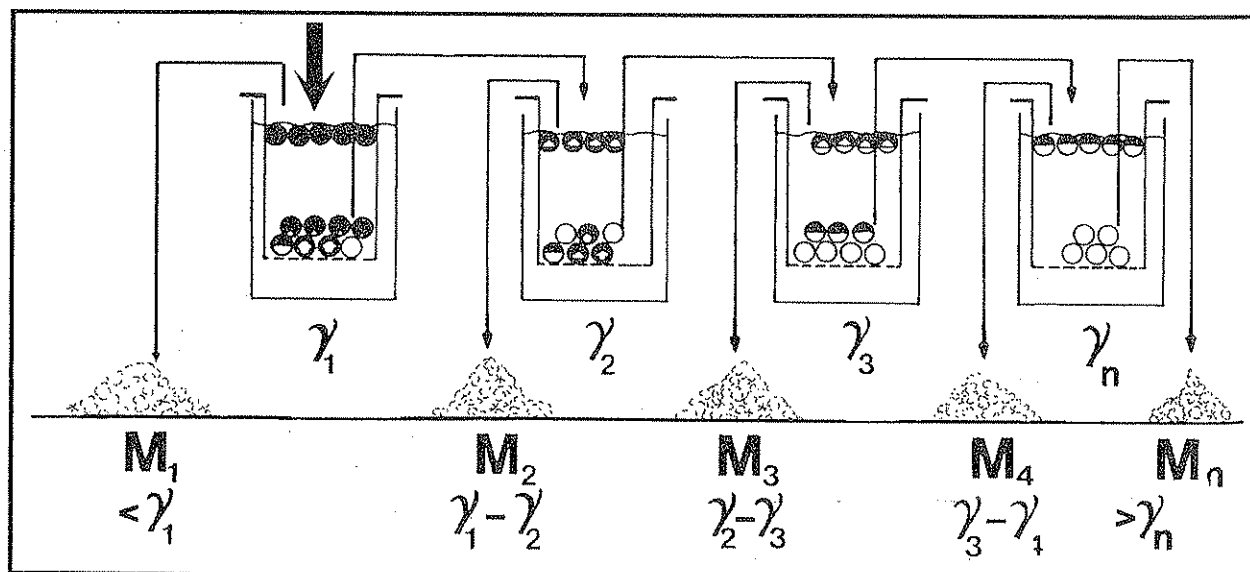
- **Razlike u gustinama mineralnih zrna i teške tečnosti** i to na sledeći način: što je razlika u gustinama veća time je postupak raslojavanja (tonjenja zrna) brži.

- **Viskozitet teške tečnosti**, koji u izvesnom stepenu zavisi od temperature; povećanjem temperature viskozitet će opasti, međutim, to može istovremeno dovesti i do promene njene gustine.

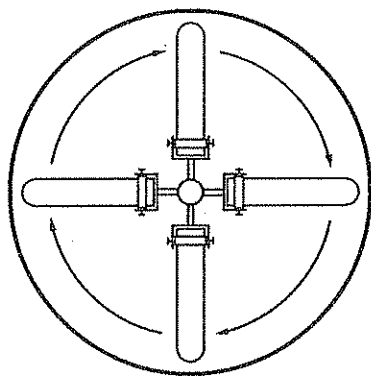
7.2.8 RAZDVAJANJE U TEŠKIM TEČNOSTIMA POMOĆU CENTRIFUGE

Za sitnozrne sirovine - prosečne krupnoće ispod 100 μm , pa čak i 300 μm ali ne sitnija od 10 μm , brzina taloženja zrna teške frakcije tokom razdvajanja u teškim tečnostima je veoma mala i potrebno je izuzetno dugo vreme za uspešno frakcionisanje. U takvim slučajevima razdvajanje minerala prema gustini moguće je ubrzati korišćenjem centrifugalnih uređaja (Sl.7.15).

Razdvajanje minerala se u tom slučaju vrši u staklenim sudovima - kivetama, u koje se ubacuje uzorak i teška tečnost. Uređaji imaju po dve ili četiri kivete koje se postavljaju u odgovarajuće metalne nosače a rade pri velikom broju obrtaja. Kod rada sa ovim uređajem vrlo je važno da se obrati pažnja da kivete sa uzorcima i teškom tečnošću, postavljene jedna nasuprot drugoj, budu potpuno identičnih masa. Svako neujednačavanje masa može dovesti do njihovog lomljenja, izazivanja kvara kao i povređivanja izvođača eksperimenta. Nakon izvršenog razdvajanja minerala, centrifugom tokom nekoliko minuta (potrebno vreme zavisi od brzine rotiranja i krupnoće zrna) pažljivo se odliva teška tečnost sa lakom frakcijom u levak sa filter papirom, ispira i suši; isti postupak se ponavlja i sa teškom frakcijom. Posebnu pažnju treba obratiti, prilikom odlivanja iz kivete, da ne dođe do međusobnog mešanja frakcije koja pliva i frakcije koja tone.

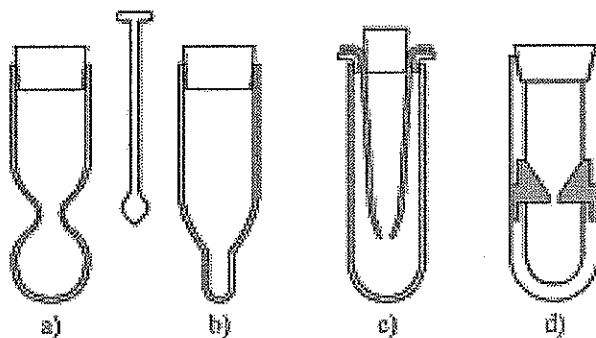


Sl.7.14 Izvođenje P-T analize uzoraka relativno većih masa, krupnozrnog ili krupnokomadastog materijala (čišćenje uglja, nemetala)



Sl. 7.15 Raslojavanje minerala u teškim tečnostima uz pomoć centrifuge

Različiti proizvođači centrifugalnih uređaja, za različite mineralne sirovine su predvideli nekoliko tipova konstrukcija kiveta. Neke od karakterističnih tipova prikazane su i na Sl. 7.16.



Sl. 7.16 Različite konstrukcije kiveta koje se koriste pri raslojavanju minerala uz pomoć centrifuge

Primena aparata za centrifugiranje. Razdvajanje zrna u teškoj tečnosti odvija se brže ili sporije, zavisno od gustine minerala, krupnoće zrna, viskoziteta teške tečnosti i drugih osobina. Brzina taloženja zrna u teškoj tečnosti, prema tome, je upravo proporcionalna razlici gustina mineralnih zrna i tečnosti u kojoj se vrši raslojavanje, sili koja uzrokuje taloženje i obrnuto viskozitetu tečnosti.

$$v = k \cdot \frac{F \cdot (\rho_m - \rho_t)}{\mu}$$

gde su:

- v - brzina taloženja
- k - koeficijent proporcionalnosti
- F - sila koja deluje pri razdvajanju
- ρ_m i ρ_t - gustina minerala i teške tečnosti i
- μ - viskozitet teške tečnosti.

Sila koja deluje pri razdvajanju mineralnih zrna u teškoj tečnosti je $F = m \cdot g$, gde je m - masa zrna a g - ubrzanje sile teže. Pošto je masa zrna određena gustinom i prečnikom zrna, tada je kod krupnijih zrna brzina taloženja veća a kod sitnijih veoma mala. Zbog toga, kod raslojavanja sitnijih zrna (<0,3 mm) treba koristiti centrifugalnu silu koja je za hiljadu i više puta veća od sile zemljine teže.

Tečnosti koje imaju povećani viskozitet nisu pogodne za raslojavanje zrna pod dejstvom sopstvene mase, pa i u tim slučajevima treba primeniti centrifugalnu silu.

Izračunavanje potrebnog vremena pri raslojavanju minerala centrifugiranjem. Važno je istaći da se rad centrifuge pri izdvajanju teških minerala iz sirovine zasniva na načelu da će zrna, koja imaju gustinu manju od one koju ima teška tečnost, uvek plivati, na toj teškoj tečnosti, bez obzir na brzinu rotacije, vreme centrifugiranja ili krupnoću zrna.

Pitanje rada centrifuge vezuje se za nužnost da će sva zrna, koja imaju veću gustinu od same teške tečnosti, bez sumnje, imati vremena da potonu na dno kivete.

Koristeći se Stokes-ovim zakonom kao i metodama Svedberg-a i Nichols-a (1923.), moguće je izvesti jednakost kojom bi se izračunalo potrebno vreme, za koje će doći do potpunog raslojavanja date sirovine postupkom centrifugiranja. Ako se potrebni parametri izraze u odgovarajućim jedinicama, jednačina će imati oblik:

$$t = \frac{9,4503 \cdot \mu \cdot 10^{10}}{s^2 \cdot r \cdot (\rho_1 - \rho_2)} \cdot K$$

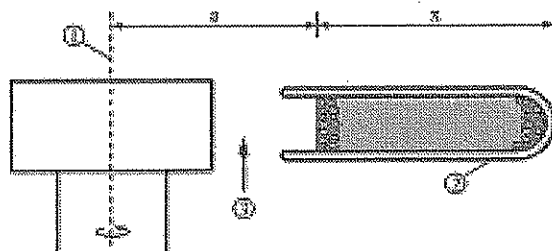
gde su:

- t - vreme (u sec) potrebno da bi zrna sedimentirala na dno kivete tokom centrifugiranja
- η - viskozitet teške tečnosti pri 20° C (pomnožen sa 0,1) u Pa s;
- r - krupnoća zrna u mm;
- s - centrifugalna brzina u ob/min;
- ρ_1 - gustina zrna g/cm³;
- ρ_2 - gustina teške tečnosti g/cm³;
- K - konstanta centrifuge, koja iznosi

$$K = \log_{10} \cdot \frac{x + a}{a}$$

gde su:

- x - nivo tečnosti u kiveti; a - rastojanje od ose rotacije do nivoa tečnosti u kiveti. (Vidi objašnjenje na slici 7.17).



Sl. 7.17 Dijagram ilustruje mesta merenja neophodnih za izračunavanje faktora centrifuge K

Pored ovoga postoje i drugi faktori čije korekcije treba uzeti u obzir. Korekcija zbog oblika zrna, jer Stokes-ov zakon uzima u obzir zaobljena sferična zrna kakva kod mineralnih sirovina retko možemo sresti; zatim korekcija zbog razlike u vremenu koje je potrebno od pokretanja centrifuge do postizanja potrebne brzine; zatim korekcija koju treba uneti ukoliko tečnost za raslojavanje nije bromoform. Prema tome ukupno korigovano vreme možemo izračunati prema sledećoj jednačini

$$T = \frac{t \cdot K \cdot A}{L \cdot D} + \frac{R}{2}$$

gde su:

- T - korigovano vreme centrifugiranja;
- t - izračunato vreme, ili očitano iz tabele;

- K - konstanta centrifuge;
 A - faktor oblika zrna (obično 1,57);
 L - faktor koji se odnosi na tešku tečnost, predstavlja odnos viskoziteta bromoforma prema viskozitetu bilo koje teške tečnosti.
 D - faktor raslojavanja $D = (\rho_1 - \rho_2) 100$;
 R - vreme rada centrifuge, separacija počinje čim centrifuga startuje sa radom pa je potrebno dodati samo polovinu vremena rada centrifuge. Za izuzetno duga vremena rada ovaj faktor može da se zanemari.

7.2.9 RASLOJAVANJE ZRNA CENTRIFUGOM

Sve centrifuge obično imaju dve, četiri ili više kiveta od po 20 ml kako bi se relativno veća količina uzorka mogla istovremeno analizirati. Kivete centrifuga mogu biti tipa Hutton ili tipa Taylor ili pak mogu biti, takozvanog tipa pipete. Ukoliko je rotaciona sila slabija one mogu biti staklene, dok se za uređaje koji rade pri velikim brzinama koriste metalne kivete ili od polipropilena. Za rutinske poslove obično se koriste kivete od po 15 ml mada neke od 10 ml ili čak 5 ml mogu dobro poslužiti u slučajevima kada su nam na raspolaganju vrlo male količine materijala za raslojavanje. Po pravilu, pri rutinskom radu raslojavanje sirovine po gustini uz pomoć centrifuge se ne može uspešno izvesti za vreme kraće od 30 sekundi, bez obzira pri kom broju obrtaja. Svakako da je za uspešno raslojavanje minerala centrifugom jedna od najvažnijih stvari odnos količine uzorka i količine teške tečnosti. Ukoliko se uzme veća količina uzorka, neće se moći uspešno izvršiti raslojavanje mineralnih zrna, jer će neka "teška" zrna ostati "zarobljena" u lakoj frakciji. Isto tako nije poželjno imati i više teške tečnosti. Svakako da za loše raslojavanje, uzrok može biti i vlaga odnosno voda u uzorku, koja prouzrokuje zgrudnjavanje zrna u veće grozdove koji će se pak ponašati kao krupna zrna čija je gustina jednaka srednjoj vrednosti gustina zrna koja ga čine. S toga se preporučuje sušenje uzoraka ili pranje sa acetonom. Generalno, kivete koje su tako konstruisane da imaju ventil - zatvarač, mogu biti korišćene kod centrifuga samo pri relativno malom broju obrtaja, inače teške tečnosti mogu biti izbačene napolje.

U svakom slučaju, prva dva tipa kiveta prikazana na slici 7.16, a napravljenih od stakla, ne bi smele da se koriste pri rotacijama većim od 3400 ob/min. Za uređaje koji mogu da rade pri znatno većem broju obrtaja koriste se druga dva tipa kiveta a napravljeni su od metala ili specijalne plastike. Za samo rukovanje kivete tipa pipete su daleko pogodnije, pri pražnjenju, jer se raslojene frakcije - laka i teška nalaze, razdvojene u posebnim prostorima.

Postupak rada:

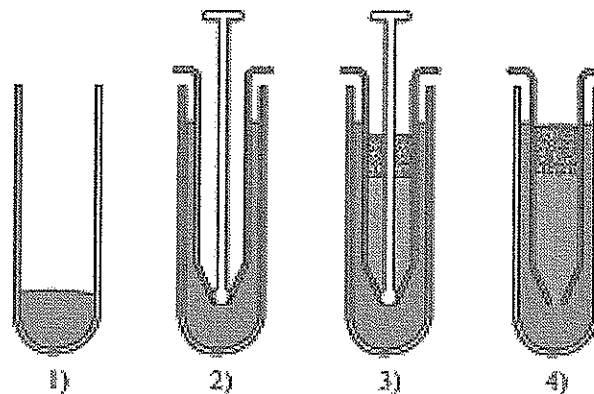
1. Postupak raslojavanja započeti sa najkrupnijom klasom krupnoće, izdvajanjem reprezentativnog uzorka do tačno određene mase. Izmeriti prema tim podacima potrebnu količinu teške tečnosti i uz intenzivnu homogenizaciju obezbediti da zrna minerala budu dobro dispergovana u njoj.

2. U spoljnu kivetu se uspe tačno određena količina teške tečnosti, istovremeno se u ostatak tečnosti potopi i dobro izmeša uzorak za analizu. Nakon toga ubaciti

unutrašnji sud pipetu, sa odgovarajućim centralnim zatvaračem u spoljnu kivetu sa teškom tečnošću.

3. Teška tečnost u kojoj se već nalazi uzorak, sipa se zatim pažljivo u unutrašnji sud do visine nešto niže od nivoa teške tečnosti u spoljašnjem sudu - kivetu. U sledećem koraku se pažljivo izvuče centralni zatvarač što će dovesti do izjednačavanja nivoa teške tečnosti u spojenim sudovima, spoljašnjem i unutrašnjem. Teška tečnost ne sme da ističe iz kivete kako ne bi došlo do gutika i samog uzorka.

4. Tako oformljene i napunjene sudove merimo, i uz eventualno dodavanje kap po kap teške tečnosti, izjednačavamo im mase. Na kraju, sve kivete su potpuno identičnih masa. Ovo je vrlo važno kako ne bi došlo do oštećenja pri radu uz veliki broj obrtaja. Na osnovu podataka vezanih za samu konstrukciju centrifuge i teške tečnosti odnosno uzorka koji se koristi izračunavamo potrebno vreme centrifugiranja.



Slika 7.18 Faze pripreme kiveta pri centrifugalnom raslojavanju minerala. **Legenda:** 1-napuniti spoljni prostor kivete teškom tečnošću; 2-postaviti na svoje mesto unutrašnju pipetu; 3-usuti tešku tečnost i uzorak u unutrašnji sud; 4-ukloniti centralni zatvarač.

Nakon raslojavanja materijala centralnim zatvaračem zatvaramo otvor unutrašnjeg suda i pojedinačno dekantiramo i filtriramo laku odnosno tešku frakciju analiziranog materijala. Izdvojene frakcije se peru i suše.

Pre samog postupka raslojavanja materijala u teškim tečnostima neophodno je:

- Materijal usko klasirati koristeći standardna laboratorijska sita;
- Svaku klasu krupnoće osušiti ili oprati acetonom;
- Za svaku krupnoću materijala izračunati vreme centrifugiranja ili se koristiti standardnim tablicama.

7.2.10 HIDRAULIČKE METODE RAZDVAJANJA MINERALA

Ove metode (najčešće zajednički zvani gravitacijske metode koncentracije) su vrlo pogodne za razdvajanje mineralnih zrna koja imaju širi raspon gustina. Hidrauličke metode (koncentracije) mogu posebno biti pogodni onda kada gustine nekih minerala prevazilaze vrednosti obično korišćenih teških tečnosti. Kod hidrauličnih metoda razdvajanja se obično (ne i isključivo) izvodi u vodi; u slučaju neophodnosti može se izdvojiti velika količina materijala.

Kriterijum koncentracije. Koliko lako se može izvesti izdvajanje (koncentracija) minerala, uz primenu gravitacijskih metoda pokazuje koeficijent koji se naziva kriterijum gravitacijske koncentracije. On predstavlja odnos "efektivnih" gustina različitih mineralnih zrna potopljenih u sredinu razdvajanja (teška tečnost, suspenzije vode i minerala):

$$\text{Kriterijum koncentracije} = \frac{\rho_{\Delta m} - \rho_f}{\rho_{\Delta m} - \rho_f}$$

gde su:

- $\rho_{\Delta m}$ - vrednost gustine minerala sa većom gustinom (g/cm^3);
- $\rho_{\Delta m}$ - vrednost gustine minerala sa manjom gustinom (g/cm^3);
- ρ_f - gustina fluida (po pravilu to je najčešće voda, međutim, ovo može biti i teška tečnost ili jednostavno vazduh).

U slučaju da je kriterijum koncentracije za dve grupe zrna veći od 2,5 razdvajanje se može izvesti bez poteškoća i može se izvoditi u širem rasponu krupnoća zrna. Ukoliko je ova veličina manja od 1,25 dobro razdvajanje gravitacijskim postupkom (hidrauličkim metodama), pre svega, se pokazalo relativno težom za zrna gde je raspon krupnoće bio širi. Jednačina jasno pokazuje da je veća gustina tečnosti u kojoj se vrši razdvajanje (koncentracija) (a bliža gustini lakšeg materijala) time je kriterijum koncentracije veći i time se lakše izvodi izdvajanje. Prema tome, što je gustina tečnosti bliža po vrednosti gustini minerala sa manjom gustinom, separacija odnosno razdvajanje se odvija kao u teškim tečnostima. Na primer, ako je neophodno razdvojiti kvarc (gustine 2,65) i dijamant (gustine 3,50) tada kriterijum koncentracije za ova dva minerala u medijumu voda (gustine 1,0) iznosi oko 1,50; kriterijum koncentracije za iste ove minerale ali u trihloretanu (gustine 1,46) iznosi 1,70 a u vazduhu (gustine 0) on je samo 1,30.

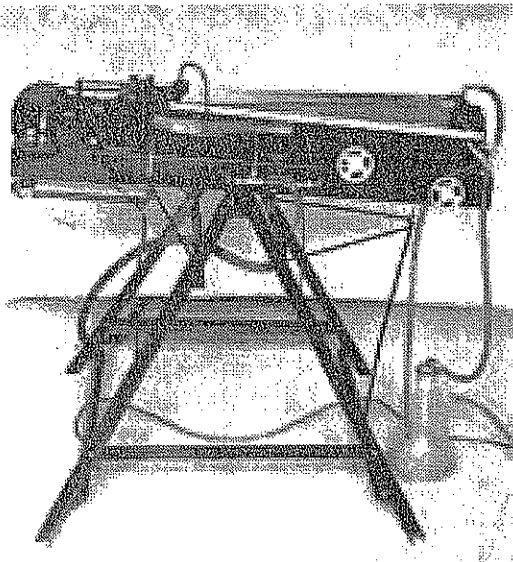
7.2.11 HOLTENOV STO - SUPERPANNER

Kao poseban postupak kod laboratorijskih ispitivanja mogućnosti selektivnog izdvajanja mineralnih zrna prema njihovoj gustini koriste se različiti laboratorijski uređaji od kojih su najinteresantniji superpaner (*Haultain*-ov sto) i mikropaner ili kako ih drugačije možemo nazvati "superispitak". Uređaji mogu da se koriste za sve sirovine, bez ograničenja u pogledu gustina mineralnih zrna (ovo je jednovremeno i prednost nad teškim tečnostima), a uspešno je odvajanje mineralnih zrna do krupnoće od oko 20 μm . Holtenov sto sastoji se od jednog plitkog korita u obliku slova V koje se nalazi na postolju. Pomoću relativno složenog mehanizma kretanje korita imitira (simulira) ručno ispiranje minerala pomoću ispitaka, rudarskog tanjira i sličnih pomagala.

U toku opita uslovi rada mogu da se podešavaju prema sirovini regulisanjem:

- nagib stola
- brzine uzdužnog klaćenja korita i intenziteta udara
- amplitude klaćenja korita po kraćoj osi, za širi i uži kraj korita
- količine spirne vode
- količine vode u najdubljem delu korita.

Masa uzorka treba da je oko 5 g i po mogućnosti da je uzorak usko klasiran. Uzorak se u jednoj staklenoj čaši nakvasi vodom i postepeno prebacuje u najdublji deo korita. Uslove rada regulisati tako da se prvo izdvoji laka frakcija, zatim srednje teška i na kraju teška frakcija minerala.



Sl.7.19 Izgled Holtenovog (*Haultain*) stola - superpanera

U početku, radi se sa minimalnom količinom spirne vode i minimalnim bočnim kretanjem korita, a regulišu se nagib korita i brzina kretanja korita. Intenzitet udara stola reguliše se preko jednog ekscentra, kod sitnih klasa koristi se maksimalni, a kod krupnijih treba smanjiti intenzitet udara. Grupisanje mineralnih zrna prema gustinama ostvaruje se tako što udar stola teži da pomeri zrna napred (ka užem delu korita) dok spirna voda i bočno kretanje teže da speru zrna naniže (ka širem delu korita).

7.2.12 MIKROPANER (L. D. MULLER-A)

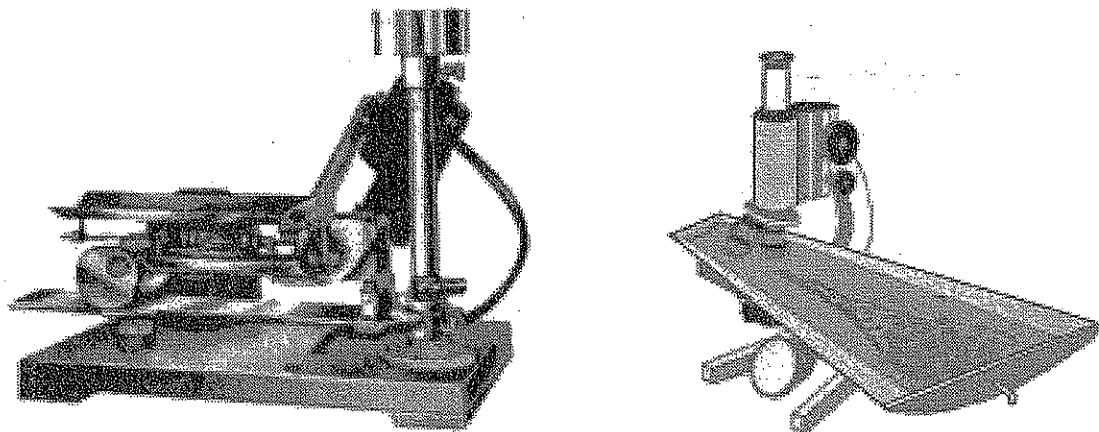
Po konstrukciji sličan je Holtenovom stolu (superpanner-u) a koristi se za analizu uzoraka malih masa (od 50 mg do 4 g) i kad je razlika u gustinama između minerala koji se razdvajaju, manja od 0,5 g/cm^3 , jer pored vode mogu da se koriste i teške tečnosti. Kada je razlika između minerala u pogledu gustina veća, krupnoća zrna može da bude i do 10 μm . Za uspešnije odvajanje zrna, treba uzorak prethodno klasirati i svaki uzorak odvojeno analizirati. Mikropaner se montira na stočić stereomikroskopa, što omogućava bolju vizuelnu kontrolu izdvajanja frakcija.



* Primer: Ispitivanje mogućnosti izdvajanja minerala (monomineralnih frakcija) iz sirovine u pretkoncentrat. Sirovina Pb-Zn rude je, nakon odgovarajuće obrade uzorka, hemijski analizirana i određen je mineralni sastav rude. *Delimični hemijski sastav* sirovine pokazuje da sadrži: Pb = 2,96 %; Zn = 2,53 %; Cu = 0,09 %; Fe = 7,43 % i S = 5,79 %. *Mineralni sastav sirovine* je (nakon proračuna metada racionalne analize) sledeći: GALENITA (PbS) = 3,43 %; MARMATITA (ZnS) = 3,78 %; HALKOPIRITA (CuFeS₂) = 0,26 %; PIROTINA (FeS) = 6,78 % i PIRITA (FeS₂) = 2,83 %. Prema tome sirovina sadrži 17,08 % sulfidnih minerala ili minerala nosilaca metala i 82,92 % petrogenih minerala (jalovine).

Sirovina je klasirana, svaka klasa krupnoće je podvrgnuta hemijskoj analizi i izračunate su raspodele osnovnih metala odnosno minerala. Rezultati granulometrijskog i hemijskog sastava dati su u tablici 7.8. Dalje, svaka klasa krupnoće je potapana u rastvore teških tečnosti i vršeno je raslojavanje zrna

po gustini. Pliva–tone analiza je vršena u razrezenom bromoformu na gustinama 2,70 / 2,80 / 2,89 g/cm³, tako da su dobijene četiri različite frakcije. Rezultati su prikazani u narednoj tablici 7.8.



Sl.7.20 Konstrukcija mikropanera (levo) i šematizovani izgled uređaja (desno) smeštenog na stočić mikroskopa (po L. D. Milleru)

Tablica 7.8. Granulometrijski i hemijski sastav rude Pb–Zn

Klase krupnoće	M, %	Pb, %	M x Pb	R _{Pb} , %	Zn, %	M x Zn	R _{Zn} , %
–60+30	57,41	2,94	168,66	56,96	2,48	142,47	56,20
–30+10	28,90	2,95	85,24	28,78	2,60	75,08	29,66
–10+3	11,65	2,96	34,50	11,64	2,49	29,02	11,45
–3+0	2,04	3,80	7,75	2,64	3,43	6,81	2,69
ULAZ:	100,00	2,96	296,15	100,00	2,53	253,38	100,00

Tablica 7.9 Pliva – tone analiza rude Pb–Zn

Klase krupnoće (mm)	Maseni udeo M, %	Gustine frakcija	Masa frakcije, %		Pb, %	MxPb	Raspodela Pb, %		Zn, %	MxZn	Raspodela Zn, %	
			na klasu	na rudu			na klasu	na rudu			na klasu	na rudu
–60+30	57,41	< 2,70	16,00	9,18	–	–	–	–	–	–	–	–
		2,70–2,80	22,38	12,85	–	–	–	–	–	–	–	–
		2,80–2,89	5,80	3,33	0,12	0,40	0,24	0,14	0,05	0,17	0,20	0,07
		> 2,89	55,82	32,05	5,25	168,26	99,76	56,82	4,44	142,30	99,88	56,13
		Suma:	100,00	57,41	2,94	168,66	100,00	56,96	2,48	142,47	100,00	56,20
–30+10	28,90	< 2,70	14,81	4,28	0,10	0,43	0,50	0,14	0,08	0,34	0,47	13,94
		2,70–2,80	25,28	7,31	0,02	0,15	0,17	0,05	0,31	2,19	2,92	0,87
		2,80–2,89	6,59	1,90	0,03	0,06	0,07	0,02	0,55	1,05	1,40	0,42
		> 2,89	53,32	15,41	5,49	84,60	99,26	28,57	4,64	71,50	95,23	28,25
		Suma:	100,00	28,90	2,95	85,24	100,00	28,78	2,60	75,08	100,00	29,66
–10+3	11,66	< 2,70	26,47	3,08	0,16	0,49	1,43	0,17	0,15	0,46	1,58	0,18
		2,70–2,80	14,29	1,66	0,10	0,17	0,84	0,06	0,30	0,50	1,72	0,20
		2,80–2,89	4,12	0,48	0,04	0,02	0,05	0,00	0,31	0,15	0,52	0,06
		> 2,89	55,12	6,43	5,26	33,82	98,04	11,41	4,34	27,91	96,18	11,01
		Suma:	100,00	11,65	2,96	34,50	100,00	11,64	2,49	29,02	100,00	11,45
–3+0	2,04	Suma:	–	2,04	3,80	7,75	100,00	2,64	3,43	6,81	100,00	2,69
ULAZ:	100,00	–	–	100,00	2,96	296,15	–	100,00	2,53	253,38	–	100,00

Kako bi izdvojili pretkoncentrat određenog kvaliteta, u narednim tablicama (Tablice 7.9 - 7.13) su prikaza-

ni rezultati P–T analize u formi bilansa metala, sumarno za svaku gustinu raslojavanja.

Tablica 7.10 Pliva-Tone analiza Pb-Zn rude, BILANS METALA sumarno za frakciju lakšu od 2,70 g/cm³.

Klase krupnoće	Maseni udeo frakcije, %	Sadržaj Pb, %	Jedinice metala MxPb	Raspodela R _{Pb} , %	Sadržaj Zn, %	Jedinice metala MxZn	Raspodela R _{Zn} , %
-60+30	9,18	—	—	—	—	—	—
-30+10	4,28	0,10	0,43	0,14	0,08	0,34	0,13
-10+3	3,08	0,16	0,49	0,17	0,15	0,46	0,18
ULAZ:	16,54	0,05	0,92	0,31	0,05	0,80	0,31

Tablica 7.11 Pliva-Tone analiza Pb-Zn rude, BILANS METALA sumarno za frakciju 2,70–2,80 g/cm³.

Klase krupnoće	Maseni udeo frakcije, %	Sadržaj Pb, %	Jedinice metala MxPb	Raspodela R _{Pb} , %	Sadržaj Zn, %	Jedinice metala MxZn	Raspodela R _{Zn} , %
-60+30	12,85	—	—	—	—	—	—
-30+10	7,31	0,02	0,15	0,05	0,30	0,19	0,86
-10+3	1,66	0,10	0,17	0,06	0,30	0,50	0,50
ULAZ:	21,82	0,01	0,32	0,11	1,12	2,69	1,06

Tablica 7.12 Pliva-Tone analiza Pb-Zn rude, BILANS METALA sumarno za frakciju 2,80–2,89 g/cm³.

Klase krupnoće	Maseni udeo frakcije, %	Sadržaj Pb, %	Jedinice metala MxPb	Raspodela R _{Pb} , %	Sadržaj Zn, %	Jedinice metala MxZn	Raspodela R _{Pb} , %
-60+30	3,33	0,12	0,40	0,14	0,05	0,17	0,07
-30+10	1,90	0,03	0,06	0,02	0,55	1,05	0,42
-10+3	0,48	0,04	0,02	0,00	0,32	0,15	0,06
ULAZ:	5,71	0,08	0,48	0,16	0,24	1,37	0,55

Tablica 7.13 Pliva-Tone analiza Pb-Zn rude, BILANS METALA sumarno za frakciju težu od 2,89 g/cm³.

Klase krupnoće	Maseni udeo frakcije, %	Sadržaj Pb, %	Jedinice metala MxPb	Raspodela R _{Pb} , %	Sadržaj Zn, %	Jedinice metala MxZn	Raspodela R _{Pb} , %
-60+30	32,05	5,25	168,26	56,28	4,44	142,30	56,13
-30+10	15,41	5,49	84,60	28,57	4,64	71,50	28,25
-10+3	6,43	5,26	33,82	11,41	4,34	27,71	11,01
ULAZ:	53,89	5,32	286,68	96,80	4,48	241,71	95,39

Prema rezultatima prikazanim u prethodnim tablica-
ma oformljena je tablica 7.14 kao pregledna.

Prema tome konačni bilans metala, pretkoncentraci-
je ove rude dat je u tablici 7.15.

Tablica 7.14 Pliva-Tone analiza Pb-Zn rude, BILANS METALA sumarno za frakcije lakše od 2,89 g/cm³.

Gustine frakcija	Maseni udeo frakcije, %	Sadržaj Pb, %	Jedinice metala MxPb	Raspodela R _{Pb} , %	Sadržaj Zn, %	Jedinice metala MxZn	Raspodela R _{Pb} , %
<2,70	16,54	0,06	0,92	0,31	0,05	0,80	0,31
2,70– 2,80	21,82	0,01	0,32	0,11	1,12	2,69	1,06
2,80– 2,89	5,71	0,08	0,48	0,16	0,24	1,37	0,55
Suma:	44,07	0,04	1,72	0,58	0,11	4,86	1,92

Tablica 7.15 Bilans metala u postupku pretkoncentracije

Proizvodi	Maseni udeo frakcije, %	Sadržaj Pb, %	Jedinice metala MxPb	Raspodela R _{Pb} , %	Sadržaj Zn, %	Jedinice metala MxZn	Raspodela R _{Zn} , %
Ulazna ruda	100,00	2,96	296,16	100,00	2,53	253,80	100,00
Predkoncentrat	53,89	5,32	286,68	96,80		241,71	95,39
Klasa -3+0mm	2,04	3,80	7,75	2,62	3,34	6,81	2,69
Jalovina	44,07	0,04	1,72	0,58	0,11	4,86	1,92
Pretkoncentrat + klasa (-3+0mm)	55,93	5,26	294,43	99,42	4,44	248,52	98,08



❖ Primer: Na siromašnoj rudi gvoža neophodno je izvršiti P-T analizu, i ispitati mogućnost izdvajanja predkoncentrata određenog kvaliteta, odnosno ukloniti na ovaj način veći deo jalovine. Rovna ruda je klasirana, svaka klasa je hemijski analizirana i izračunata je raspodela Fe po klasama krupnoće. Određene količine dobijenih klasa krupnoće su potapane u ras-

tvore teške tečnosti, rastućih gustina; izdvojene su frakcije određenih gustina koje su merene, analizirane na sadržaj Fe i izračunata je raspodela po raslojenim klasama i po frakcioniranoj sirovini. Rezultati su prikazani tabelarno (Tablice 7.16 - 7.1) u formi P-T analize rude Fe i u formi bilansa metala.

Tablica 7.16 Granulometrijski i hemijski sastav rude Fe

Klase krupnoće, mm	M, kg	M, %	Fe, %	M x Fe	R _{Fe} , %
-30+10	23,50	47,00	43,08	2024,76	46,57
-10+3	17,65	35,30	43,84	1547,55	35,59
-3+1	7,10	14,20	44,62	633,60	14,57
-1+0	1,75	3,50	40,58	142,03	3,27
ULAZ:	50,00	100,00	43,48	4347,94	100,00

Tablica 7.17 Pliva – tone analiza rude Fe

Klase krupnoće (mm)	Maseni udeo M, %	Gustine frakcija	Masa frakcije, %		Fe, %	MxFe	Raspodela Fe, %	
			na klasu	na rudi			na klasu	Na rudi
-30+10	47,00	< 2,70	5,63	2,65	17,00	95,71	2,22	1,03
		2,70–2,80	8,44	3,97	31,17	263,07	6,11	2,84
		> 2,80	85,93	40,38	45,96	3949,34	91,67	42,70
		Suma:	100,00	47,00	43,08	4308,12	100,00	46,57
-10+3	35,30	< 2,70	8,60	3,04	15,35	132,01	3,01	1,07
		2,70–2,80	5,92	2,09	35,40	209,97	4,78	1,70
		> 2,80	85,48	30,17	47,29	4942,35	92,21	32,82
		Suma:	100,00	35,30	43,84	4383,93	100,00	35,59
-3+1	14,20	< 2,70	5,56	0,79	22,50	125,10	2,81	0,41
		2,70–2,80	3,90	0,55	26,68	104,05	2,33	0,34
		> 2,80	90,54	12,86	46,75	4232,75	94,87	13,82
		Suma:	100,00	14,20	44,62	4461,90	100,00	14,77
-1+0	3,50	Suma:	100,00	3,50	40,58		100,00	3,27
ULAZ:	100,00	–	–	100,00	43,48	–	–	100,00

Tablica 7.18 Pliva–Tone analiza Fe rude, BILANS METALA sumarno za frakciju lakšu od 2,70 g/cm³.

Klase krupnoće, mm	Maseni udeo frakcije, %	Sadržaj Fe, %	Jedinice metala MxFe	Raspodela R _{Fe} , %
-30+10	2,65	17,00	45,07	1,03
-10+3	3,04	15,35	46,66	1,07
-3+1	0,79	22,50	17,78	0,41
ULAZ:	6,48	16,90	109,51	2,51

Tablica 7.19 Pliva–Tone analiza Fe rude, BILANS METALA sumarno za frakciju 2,70–2,80 g/cm³.

Klase krupnoće, mm	Maseni udeo frakcije, %	Sadržaj Fe, %	Jedinice metala MxFe	Raspodela R _{Fe} , %
-30+10	3,97	31,17	123,74	2,84
-10+3	2,09	35,40	73,99	1,70
-3+1	0,55	26,68	14,67	0,34
ULAZ:	6,61	32,13	212,40	4,88

Tablica 7.20 Pliva–Tone analiza Fe rude, BILANS METALA sumarno za frakciju težu od 2,80 g/cm³.

Klase krupnoće, mm	Maseni udeo frakcije, %	Sadržaj Fe, %	Jedinice metala MxFe	Raspodela R _{Fe} , %
-30+10	40,38	45,96	1855,86	42,70
-10+3	30,17	47,29	1426,74	32,82
-3+1	12,86	46,75	601,21	13,82
ULAZ:	83,41	46,56	3883,81	89,34

Tablica 7.21 Pliva-Tone analiza Fe rude, BILANS METALA sumarno za frakcije lakše od 2,80 g/cm³.

Gustine frakcija	Maseni udeo frakcije, %	Sadržaj Fe, %	Jedinice metala MxFe	Raspodela R _{Fe} , %
<2,70	6,48	16,90	109,51	2,51
2,70-2,80	6,61	32,13	212,40	4,88
Suma:	13,09	24,59	321,91	7,39

Tablica 7.22 Bilans metala u postupku pretkoncentracije rude gvoža

Proizvodi	Maseni udeo frakcije, %	Sadržaj Fe, %	Jedinice metala MxFe	Raspodela R _{Fe} , %	Gustina raslojavanja
Ulazna ruda Fe	100,00	43,48	4347,75	100,00	—
Predkoncentrat	83,41	46,56	3883,81	89,34	>2,80
Jalovina	13,09	24,99	321,91	7,39	<2,80
Klasa -1+0mm	3,50	40,58	142,03	3,27	
Jalovina + (klasa -1+0mm)	16,59	27,96	463,94	10,66	

Primenjeni postupak P-T analize, kao i sačinjeni bilans metala dat u tablici 7.22, pokazao je opravdanost izdvajanja jednog pretkoncentrata: sa masenim udelom 83,41 %, sadržajem Fe=46,56 % i iskorišćenjem od 89,34 %. Istovremeno bi se iz daljeg tretmana uklonila jalovina sa masenim udelom od 13,09 % odnosno mulj (klasa krupnoće -1=0 mm) sa 3,50 %, dok bi sadržaji gvožđa iznosili 24,00 % i 40,58 % odgovarajuće. Odstranjivanjem oba ova proizvoda prouzrokovao bi gubitak Fe od svega 10,66 %. Kako je ovde reč o laboratorijskim ispitivanjima, odnosno bilansima u idealnim (skoro teoretskim) uslovima, ovakva ispitivanja uvek uzimati u ozbiljna razmatranja sa sadašnjeg tehnološko-ekonomskog aspekta pri valorizaciji date i svake druge sirovine.

7.2.13 PLIVA-TONE ANALIZA UGLJA

Ugljevi čiji se kvalitet poboljšava primenom gravitacijske koncentracije, redovno se predhodno ispituju analizom Pliva-Tone. Rovni ugalj koji se dobija otkopavanjem iz ležišta, sadrži pretežno korisnu komponentu - organsku materiju odnosno čisti ugalj i u većoj ili manjoj meri minerale jalovine.

Ugalj je sedimentna stena i javlja se u obliku slojeva koji leže između neorganskih sedimenata - povlate i podine. Podinu i povlatu ugljenih slojeva (ili proslojke i sočiva) najčešće čine glinovite stene (gline, glinci i peskovite gline), zatim peščari, krečnjaci, dolomiti. Prelaz između ugljenog sloja, podine i povlate nekada je veoma jasno izražen, a u izvesnim slučajevima postupan i nejasan. U zavisnosti od ovih karakteristika i geomehaničkih osobina povlate i podine primenjuje se i određena metoda eksploatacije ugljenog sloja. U samom ugljenom sloju nalaze se mnogobrojne mineralne primese, koje se po vremenu, mestu i načinu postanka izdvajaju u grupu singenetskih i grupu epigenetskih.

Singenetske mineralne primese talože se istovremeno sa akumulacijom biljnog materijala u tresetištu i predstavljene su uglavnom kvarcom, liskunima, glinom i konkrecijama (bubrežaste i loptaste forme promenljivih veličina) piritu, markasitu, limonitu, magnetitu, hematitu, sideritu, krečnjaka, dolomita i dr.

Epigenetske mineralne primese su infiltracionog karaktera, tj. dospale su u ugljeni sloj nakon njegovog for-

miranja, infiltracijom i izluživanjem mineralnih materija duž prslina u ugljenom sloju. Epigenetske mineralne primese javljaju se u ugljenom sloju u tankim prevlakama i žilicama, a čine ih kalcit, gips, kvarc, pirit, kalin i drugi minerali. Iz prethodnog izlaganja jasno proizilazi da će se u jednom rovnom uglju dobijenom otkopavanjem iz ležišta nalaziti komadi čistog uglja, zatim komadi u kojima je ugljena masa manje ili više srasla sa mineralima jalovine (srasla zrna) i komadi čiste ili relativno čiste (slobodne) jalovine, koji potiču iz povlate i podine ili sočivastih proslojaka ugljenog sloja.

Danas je u praksi PMS prihvaćeno da se kod ugljeva razlikuje prava gustina i zapreminska masa (kao prividna gustina). Pod pravom gustinom uglja podrazumeva se masa 1 cm³ organske mase, bez mineralnih primesa i vode, pa je otuda veličina prave gustine u direktnoj zavisnosti od petrografskog sastava čistog uglja, tako imamo:

- ♦ fuzen - 1,37 do 1,52;
- ♦ vitren - 1,28 do 1,30;
- ♦ klaren - 1,27 do 1,29;
- ♦ duren - 1,20 do 1,36;

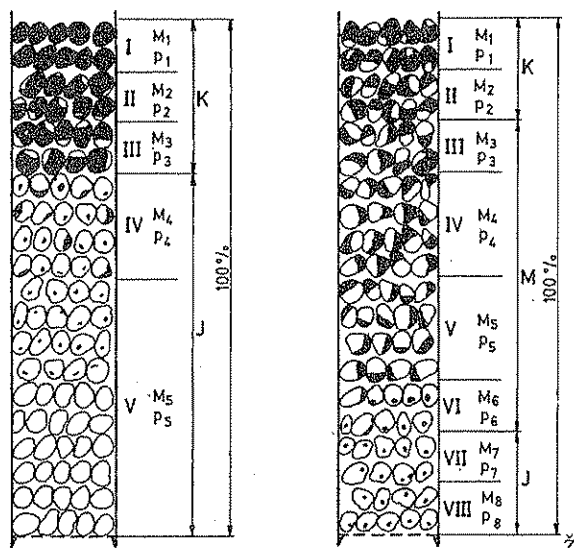
Gustina, takođe, zavisi i od stepena karbonizacije (treset 0,70 i raste preko mrkih i kamenih ugljeva do antracita, kod kojih ova vrednost iznosi oko 1,60). Pod zapreminskom masom uglja (prividna gustina) podrazumeva se masa 1 cm³ rovnog uglja, tj. uglja u prirodnom stanju sa vlagom u porama i mineralnim primesama.

Mineralne primese imaju gustine pretežno između 1,80 i 5,20 g/cm³, čist ugalj mlađi i mrki ugalj 1,10 do 1,20; kameni 1,20 do 1,30; antracit 1,30 do 1,50; a komadi u kojima je ugalj srasao sa mineralima jalovine imaće gustinu veću od čistog uglja. Što je veća gustina ovih komada veći je i udeo minerala jalovine u njima i obratno. Sa povećanjem gustine komada, povećava se i sadržaj pepela u uglju.

Da bi se dobio uvid u kvalitativno - kvantitativni sastav jednog rovnog uglja, na osnovu koga mogu da se očekuju i određeni rezultati primenom gravitacijske koncentracije, neophodno je da se utvrdi raspodela komada i zrna različitih gustina u uglju, a u vezi sa tim i promena sadržaja pepela. Takvo ispitivanje uglja izvodi se raslojavanjem u teškim tečnostima na frakcije određenih gustina.

Na slici 7.21 ilustrovana je usitnjena mineralna sirovina (ugalj, nemetalna ili metalna sirovina) koja se u laboratorijskim uslovima ispituje na mogućnost njene gravitacijske koncentracije. Prikazan je primer raslojavanja jedne klase krupnoće uzorka rovnog uglja. Raslojeni ugalj s obzirom na sadržaj pepela predstavlja sirovinu koja se lako "čisti", sa relativno ostrim i jasnim granicama raslojavanja. Nasuprot ovoj sirovini na narednoj slici 7.22 je prikazana sirovina koja se teško raslojava, zbog određenih strukturno-teksturnih karakteristika, odnosno složenosti prorastanja minerala jalovine sa korisnom komponentom.

Pliva-Tone analiza uglja izvodi se u vodenom rastvoru cink-hlorida ($ZnCl_2$), ređe u drugim teškim tečnostima, jer je gustina čistog uglja i uglja sraslog sa mineralima jalovine relativno niska. Za dobijanje vodenih rastvora cink-hlorida, različitih gustina, mogu da se koriste podaci iz tablice 7.22.



Slika 7.21 Ilustracija sirovine koja se lako raslojava po frakcijama rastućih gustina. Slika 7.22 Ilustracija sirovine koja se teško ili otežano raslojava na frakcije rastućih gustina.

U zavisnosti od vrste uglja u sudovima za potapanje uglja se pripremaju, rastvori sledećih gustina:

- ♦ za lignite: 1,10-1,15-1,20-1,25-1,30-1,40-1,50-1,70-1,80;
- ♦ za mrke: 1,30-1,35-1,40-1,45-1,60-1,70-1,80-2,00-2,20-2,50;
- ♦ za kamene: 1,30-1,40-1,50-1,60-1,70-1,80-2,00-2,20-2,50.

Iz svake klase krupnoće izdvojiti srednji uzorak za potapanje, čija količina će da zavisi od krupnoće klase i udela pojedinih frakcija koje se dobijaju raslojavanjem. Preporučuje se da minimalna masa uzorka, reprezentativnog za datu klasu krupnoće, bude proporcionalna prečniku najkrupnijih komada u klasi (jednačina Černenka, vidi stranu 29):

$$Q_{\min} = k d_{\max} \quad (\text{kg})$$

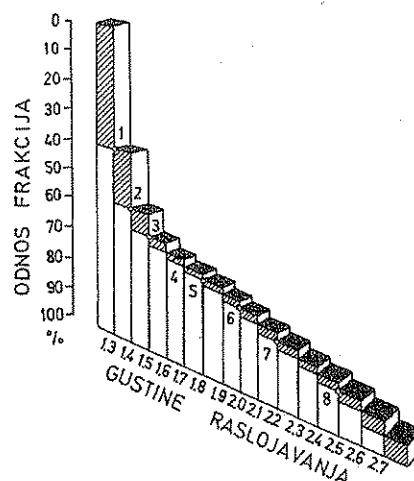
Svaku klasu krupnoće prethodno oprati vodom na situ otvora 1mm. Mulj dobijen pranjem sakupiti, sušiti, meriti i hemijski analizirati na sadržaj pepela. Po izvrše-

nom raslojavanju uglja, komadi se peru vodom, suše i mere. Po dobijanju masa frakcija, izračunavaju se njihovi udeli u ispitivanoj klasi krupnoće. Svaka dobijena frakcija uglja odvojeno se priprema za hemijsku analizu - drobi se, melje i izdvaja srednji uzorak za određivanje sadržaja ukupnog pepela. Jedino klasa krupnoće ispod 1 mm se ne potapa, zbog otežanog raslojavanja u teškim tečnostima.

Pojam - rovní ugalj - odnosi se na otkopani ugalj iz ležišta, a to znači da ga čine komadi čistog uglja, komadi slobodne jalovine iz povlate i podine i naravno komadi iz ugljenog sloja u kojima imamo u samom uglju fine proslojke ili impregnacije jalovine. Tako, ukoliko govorimo o zapreminskoj masi (prividnoj gustini) onda je reč o gustini rovnog uglja.

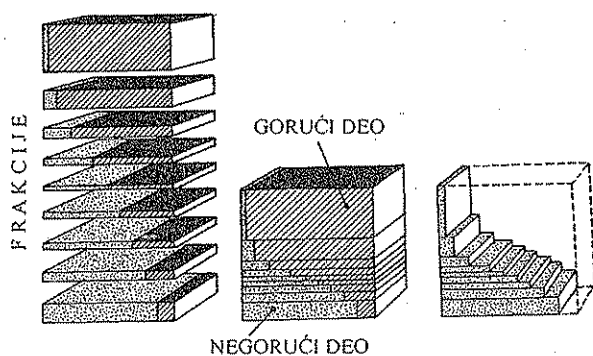
Tablica 7.22 Odnos čvrstog (kristalnog) cinkhlorida i vode u rastvorima različitih gustina koji se koriste za raslojavanje ugljeva

Gustina vodenog rastvora $ZnCl_2$, kg/m ³	Sadržaj kristalnog $ZnCl_2$ koji se rastvara (maseni %)	Količina vode u rastvoru date gustine, %
1250	26	74
1300	31	69
1350	35	65
1400	39	61
1450	42	58
1500	46	54
1550	49	51
1600	52	48
1650	55	45
1700	58	42
1800	63	37
2000	72	28
2100	78	22



Slika 7.23 Sastav rovnog uglja i produkti njegovog sagorevanja.

Količina neorganskog pepela posle sagorevanja rovnog uglja uvek je manja od količine mineralnih primesa koje se nalaze u rovnom uglju. Prema tome mineralne primese nikad nisu jednake pepelu, jer organski i neorganski deo pepela čine ukupni pepeo u uglju. Organski deo rovnog uglja analizira se elementarnom analizom, a kvalitet celokupnog uglja analizira se tehničkom analizom.



Sl.7.24 Prikaz raslojenog rovnog uglja na frakcije određenih gustina i proizvodi sagorevanja (negorući deo ili pepeo i gorući deo organska materija)

7.2.14 ČIŠĆENJE UGLJA

Čišćenje uglja podrazumeva uklanjanje neorganskog materijala iz uglja da bi se smanjio sadržaj pepela u preostalom delu, a time se povećava toplotna-energetska moć. Zavisno od vrste i krupnoće mineralnih primesa, teksturno-strukturnih odnosa, petrogrfskog sastava i granulometrijskog sastava sirovine, priprema uglja može da se vrši na više načina: samo klasiranjem (često neodgovarajuće nazvanim "suva separacija uglja"), čišćenjem uglja u vodi, teškim tečnostima ili teškoj sredini, a kvalitetniji ugljevi u mašinama taložnicama ili flotacijom. Priprema uglja u postrojenjima, tipa Kolubare, vrši se na način kako je prikazano na slici 7.25.

- ♦ Klasiranje (razvrstavanjem u sortimane prosejavanjem); i
- ♦ Čišćenje u teškoj sredini (Sl.7.25).

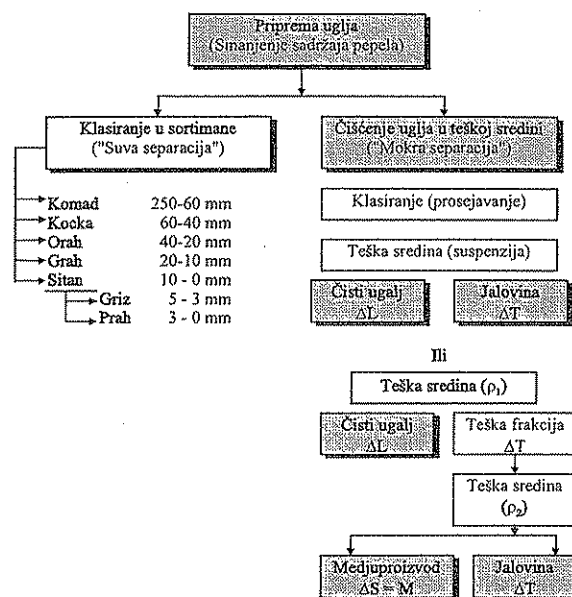
ČIST UGALJ predstavlja deo rovnog uglja koji je najkvalitetniji, a to je ujedno i proizvod koji ima najmanju gustinu. Ako se koristi direktno za loženje sadržaj pepela može da bude do 14%, a ako ide na koksovanje sadržaj pepela treba da je do 8%.

MEĐUPROIZVOD je drugi po kvalitetu proizvod i deo rovnog uglja. Sadržaj pepela može da se kreće u granicama 36-42% ukoliko proizvod ide direktno za loženje. U tim slučajevima njegovo maseno iskorišćenje treba da bude 5 do 15% (izdvajanje meuproizvoda sa učešćem do 5% nije ekonomično a preko 15% već povećava troškove transporta). Ukoliko međuproizvod može da bude korišćen u termoelektranama sadržaj pepela može da bude i veći ukoliko takav proizvod ima odgovarajuću, veću toplotnu moć i može da ima veće maseno iskorišćenje.

JALOVINA predstavlja onaj proizvod iz rovnog uglja koji se odbacuje. Sadržaj pepela je reda veličine 70% i navise i predstavlja najlošiji kvalitet rovnog uglja s napomenom, da se pomenuti procentualni podaci odnose na ugljeve tipa lignita iz Kolubare.

MOGUĆNOST ČIŠĆENJA UGLJA u teškoj sredini ispituje se **Pliva-Tone analizom**. Za ova ispitivanja uzorak se uzima iz samog ležišta ili posle drobljenja izvršenog u pogonu. Uzorak mora da zadovolji sledeće zahteve:

♦ **REPREZENTATIVNOST** (po Demond-Halferdal-u ili nekom drugom) neto masa treba da je veća ili jednaka minimalnoj masi;



Sl.7.25 Prikaz pripreme rovnog uglja (klasiranje izdrobljenog uglja, postupci "suve separacije", i postupci "moke separacije" - čišćenje u teškoj sredini).

♦ **KLASIRANJE UZORKA** prosejavanjem suvim postupkom i dobijanje klasa zaključno sa -5+3; -3+1; -1+0;

♦ **IZDVAJANJE REPREZENTATIVNIH UZORAKA** u okviru klasa krupnoće (po Černjenku minimalna masa iznosi $Q_{min} = k d_{max}$, gde je $k = 1-1,5$);

♦ **UTVRĐIVANJE ZASIĆENOSTI UGLJA VODOM** svake klase krupnoće, tj. dobijanje stabilnog stanja odnosno prividne zapreminske mase;

♦ **UTVRĐIVANJE GUSTINE VODENOG RASTVORA $ZnCl_2$** Utvrđuje se gustina vodenog rastvora koji će da da najkvalitetniji deo rovnog uglja kao plivajuću frakciju odnosno najlakšu frakciju. Sve ostale gustine vodenih rastvora treba da budu u porastu za 0.1 sve do oko 1.8. Ukoliko je maseni udeo frakcije koja se dobija ovim raslojavanjem veći od 10 do 15% onda razliku između vodenih rastvora u porastu za 0.1 treba razblažiti u nekoliko novih gustina. Izdvojene proizvode frakcije treba dobro oprati vodom, osušiti i meriti.

♦ **FRAKCIJE NAKON DROBLJENJA I MLEVENJA** svesti uzorkovanjem na masu do oko 0,5 kg za tehničku analizu. Ako se posebno ne traži pored sadržaja pepela određuje se i toplotna moć kao i ukupna vlaga h (gruba i hidroskopska). U okviru tehničke analize koja se bude radila na rudniku u hemijskoj laboratoriji određuje se procenat vlage - analitička vlaga (celokupna hidroskopska i deo grube-jamske vlage).

♦ **PRIKAZIVANJE REZULTATA** Pliva-Tone analize. Rezultati se daju tabelarno i grafički za svaku klasu krupnoće koja je predviđena za čišćenje u teškoj sredini, da bi se konačno dala i analiza svih klasa koje bi se čistile kao zajednički proizvod u teškoj sredini.

♦ **BILANS ČIŠĆENJA UGLJA** daje idejnu sliku budućeg čišćenja u postrojenju.

Šematski prikaz pripreme i sled radnji tokom Pliva-Tone analize uglja dat je na narednoj slici 7.26.

♦ **Primer:** Prikaz Pliva-Tone analize kolubarskog lignita Polje D, klase krupnoće -60+30 mm, sa rastućim vrednostima

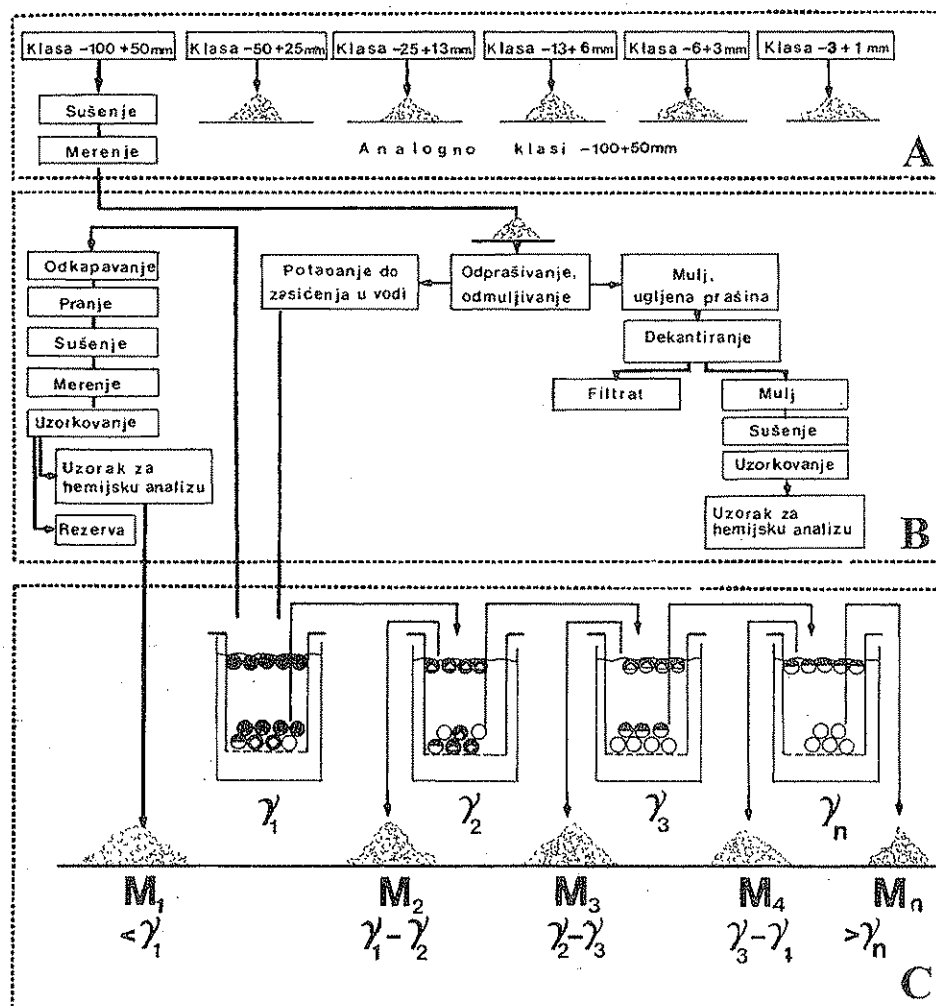
gustina raslojavanja. Posebnu pažnju obratiti na: reprezentativnost uzorka za analizu $Q_{\min} = k d_{\max}^2$ gde su $k = 0,05 \pm 0,2$ i $\alpha = 1,8 \pm 2,0$; i da uzorak date klase krupnoće za P-T analizu koji je reprezentativan bude i dovoljan $Q_{\min} = k d_{\max}^2$ (kg), gde je $k = 1 \pm 1,5$.

Iz tablice 7.23 se mogu očitati:

- srednji sadržaj pepela u jedinici ulaza iznosi 24,91 %;

- vrednost sadržaja pepela od 4,10 % (kolona 4) se odnosi na deo organskog pepela, i može orijentaciono da se uzme polovina ove vrednosti za organski pepeo;

- vrednost sadržaja pepela od 77,00 % se odnosi na neorganski pepeo - jalovinu, ostatak (između 4,10 i 77,00 %) se odnosi na srasla zrna ili komade rovnog uglja.



Sl.7.26 Šematski prikaz P-T analize uglja

Tablica 7.23 Tabela prikaz Pliva-Tone analize kolubarskog lignita Polje D, klase krupnoće -60+30 mm (po metodi H-R)

Gustine raslojavanja g/cm³	Elementarne frakcije				Frakcije koje plivaju			Frakcije koje tonu		
	M, kg	M, %	Pepeo, %	Jedinice pe- pela, M p	Suma jedinica pepela, ↓ΣM p	↓ΣM, %	↓ΣM p ↓ΣM	Suma jedinica pepela, ↑ΣM p	↑ΣM, %	↑ΣM p ↑ΣM
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
<1,10	22,41	24,90	4,10	102,09	102,09	24,90	4,10	2491,11	100,00	24,91
1,10–1,20	32,87	36,52	9,70	354,24	456,33	61,42	7,43	2389,02	75,10	38,81
1,20–1,25	7,89	8,77	19,40	170,14	626,47	70,19	8,92	2034,78	38,58	52,74
1,25–1,30	4,10	4,55	29,20	132,86	759,33	74,74	10,16	1864,64	29,81	62,55
1,30–1,40	3,20	3,56	48,20	171,59	930,92	78,30	11,89	1731,78	25,26	68,56
1,40–1,50	6,69	7,43	62,10	461,40	1392,32	85,73	16,24	1560,19	21,70	71,90
>1,50	12,84	14,27	77,00	1098,79	2491,11	100,00	24,91	1098,79	14,27	77,00
Ulaz:	90,00	100,00	24,91	2491,11	–	–	–	–	–	–

Tablica 7.24 Pliva-Tone analiza kolubarskog lignita Polja D, klase krupnoće -60+30 mm, prikaz toplotne moći

Gustine raslojavanja, g/cm ³	Elementarne frakcije		Frakcije koje plivaju		Frakcije koje tonu	
	M, kg	M, %	Toplotna moć, (kJ/kg)	Jedinice toplotne moći M (kJ/kg)	Suma jedinica ↓ΣM (kJ/kg)	Suma jedinica pepela ↑ΣM (kJ/kg)
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
<1,10	22,41	24,90	14248	354775	354775	24,90
1,10-1,20	32,87	36,52	13276	484840	839615	61,42
1,20-1,25	7,89	8,77	12096	106082	945697	70,19
1,25-1,30	4,10	4,55	10944	49795	995492	74,74
1,30-1,40	3,20	3,56	10665	37967	1033459	78,30
1,40-1,50	6,69	7,43	4459	33133	1066589	85,73
>1,50	12,84	14,27	1260	17989	1084569	100,00
Ulaz:	90,00	100,00	10846	1084569	-	-

Tablica 7.25 Bilans čišćenja uglja kolubarskog lignita polja D

Proizvodi	Maseni udeo, %	Sadržaj pepela, %	M x p	Toplotna moć, kJ/kg	M x (kJ/kg)	Gustine raslojavanja
ČU	70,19	~8,92	626,47	13473	945697	< 1,25
M	15,54	49,28	765,85	~7779	120892	1,25 - 1,50
J	14,27	70,00	1098,79	1260	17980	>1,50
RU	100,00	24,91	2491,11	10846	1084569	-

Tablica 7.26 Prikaz dobijanja međuproizvoda kod bilansiranja čišćenja uglja prikazanog u tablici 7.25.

Frakcije raslojavanja	Maseni udeo, %	Sadržaj pepela, %	M x p	Toplotna moć, kJ/kg	M x (kJ/kg)	Gustine raslojavanja
1,25÷1,30	4,55	29,20	132,86	10944	49795	< 1,25
1,30÷1,40	3,56	48,20	171,59	10655	37967	1,25 - 1,50
1,40÷1,50	7,43	62,10	461,40	4459	33130	>1,50
M-1,25÷1,50	15,54	49,28	765,85	7779	120892	-

Na ovom primeru P-T analize uglja treba očitati bilans čišćenja uglja, prema tabličnim podacima, tako da čist ugalj sadrži 9 % pepela na bezvodnu supstancu, i da međuproizvod ima toplotnu moć (ili energetska vrednost) oko 7000 kJ/kg. Rezultati su prikazani u narednoj tablici 7.25.

☑ Imati na umu da su bilansi čišćenja uglja, na osnovu P-T analize, idealni - teoretski bilansi.

Kako bi dobili odgovarajuće podatke za međuproizvod, a na osnovu zahteva u postavci samog zadatka, neophodno je sačiniti pomoćnu tablicu 7.26.

7.2.15 KRIVE ČIŠĆENJA UGLJA PO HENRY-REINHARDT-U

Iz tabličnih podataka P-T analize mogu se očitavati približni kvalitativno-kuantitativni podaci za ČU i J ili za ČU, M i J, vezujući se samo za gustine na koje je ugalj raslojavan. Dobijanje kvalitativno-kuantitativnih parametara za proizvode koji mogu da se izdvoje iz uglja pri bilo kojoj gustini, moguće je samo na osnovu očitavanja sa krivih čišćenja uglja.

Prema tabličnim podacima mogu da se konstruišu krive čišćenja uglja po metodu Henry-Reinhardt-a i to:

- ♦ kriva graničnih slojeva
- ♦ kriva srednjeg sadržaja pepela u čistom uglju
- ♦ kriva srednjeg sadržaja pepela u jalovini
- ♦ kriva gustina raslojavanja.

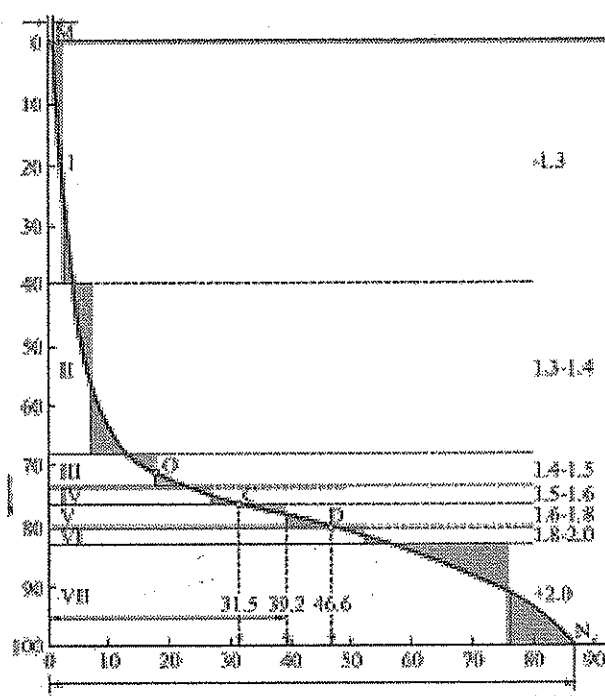
① Kriva graničnih slojeva pokazuje zavisnost između masenih udela frakcija koje plivaju i sadržaja pepela u bilo kojoj elementarnoj frakciji.

U koordinatnom sistemu, date razmere, na ordinatu se nanose maseni udeli frakcija koje plivaju (u kumulativnoj formi), prema podacima datim u koloni 3. Iz ovih tačaka na ordinati povlače se pune linije preko celog crteža, paralelne apscisi, i predstavljaju linije masenih iskorišćenja frakcija. Iz tačaka na apscisi koje odgovaraju sadržaju pepela u elementarnim frakcijama, kolona 4, podižu se vertikale u domen odgovarajuće frakcije. Na ovaj način se dobija površina (histogram) koja predstavlja količinu pepela, odnosno M x p, u elementarnim frakcijama rovnog uglja.

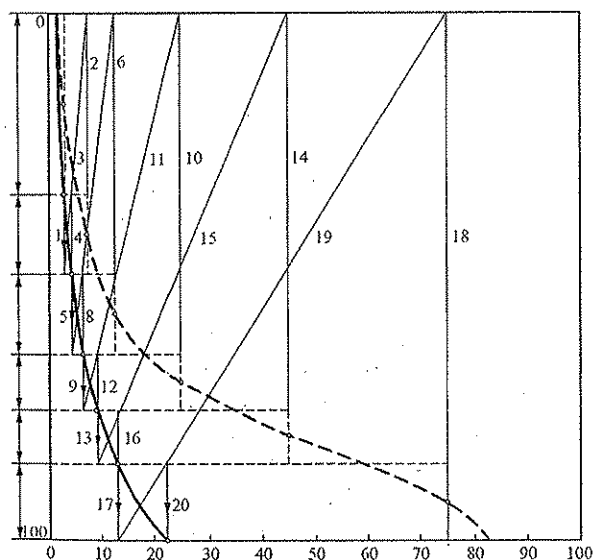
Ako bi se spojile samo desne stranice pravougaonih površina (histograma) dobila bi se poligona linija koja deli rovni ugalj na gorući deo (organsku masu) i negorući deo (pepeo). Poligona linija prevodi se u krivu, ako se na desnoj strani svakog pravougaonika (elementa histograma) nađe tačka koja označava polovinu visine pravougaonika a kroz dobijene tačke provuče kriva tako da površine trouglova koje odseca kriva u domenu svake frakcije zbirno budu međusobno jednake. Kriva polazi sa nulte linije masenog iskorišćenja iz tačke koja se udaljava od ordinate za polovinu sadržaja pepela u frakciji uglja sa najmanjom gustinom. Dobijena kriva naziva se kriva graničnih slojeva. Površina ispod krive predstavlja ukupnu količinu pepela, a površina iznad krive ukupnu količinu organskih materija sadržanih u rovnom uglju (Sl.7.28).

② Kriva srednjeg sadržaja pepela u čistom uglju pokazuje zavisnost između zbirnih (kumulativnih) masa i srednjeg sadržaja pepela u frakcijama koje plivaju, a obrazuje se prema podacima datim u kolonama 7 i 8. Kriva polazi iz iste tačke, na liniji nultog masenog iskorišćenja, iz koje polazi i kriva graničnih slojeva, a završava se na apscisi označavajući *srednji sadržaj pepela u rovnom uglju*. Dobija se spajanjem tačaka na donjem desnom uglu histograma.

Pored upravo opisanog načina, ova kriva se može konstruisati i metodom nacrtne geometrije, kao što je prikazano na slici 7.29.

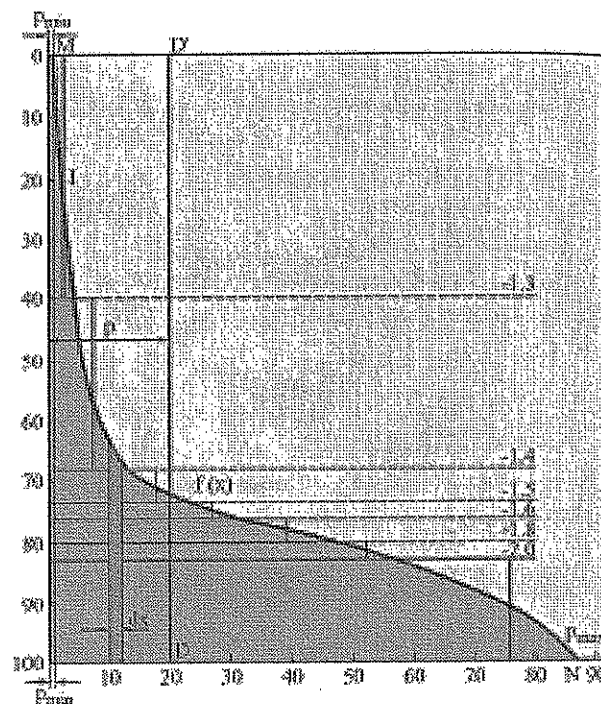


S1.7.27 Konstrukcija krive graničnih slojeva (sadržaj pepela u elementarnim frakcijama uglja)

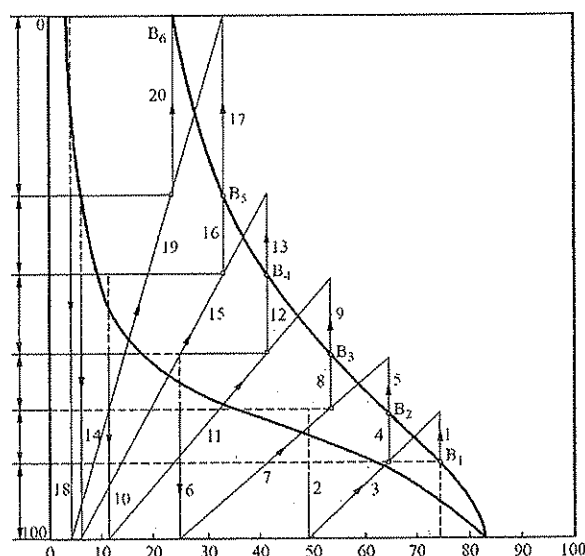


S1.7.29 Geometrijski način konstrukcije krive srednjeg sadržaja pepela u čistom uglju (frakcija koje plivaju) na osnovu podataka za iscrtavanje krive graničnih slojeva – redosled označen brojevima.

③ Kriva srednjeg sadržaja pepela u jalovini pokazuje zavisnost između zbirnih (obrnuto kumulativnih) masa frakcija koje tonu i srednjeg sadržaja pepela u tim frakcijama, a obrazuje se shodno podacima datim u kolonama 10 i 11. Linije koje označavaju masena iskorišćenja frakcija koje plivaju odgovaraju istovremeno i masenim iskorišćenjima frakcija koje tonu, s tim da skala na ordinati ima obrnuti smer. Naime, svaka linija masenog iskorišćenja deli ugalj na frakciju koja pliva i frakciju koja tone i njihova se masena iskorišćenja dopunjuju do 100 %. Otuda se na linije masenih iskorišćenja, a prema podacima u koloni 10, nanose sadržaj



S1.7.28 Ilustracija podela rovnog uglja, krivom graničnih slojeva, na gorući deo i negorući deo



S1.7.30 Geometrijski način konstrukcije krive srednjeg sadržaja pepela u jalovini (frakcije koje tonu) na osnovu podataka za dobijanje krive graničnih slojeva – redosled označen brojevima.

pepela u frakcijama koje tonu, prema podacima u koloni 11. Kriva srednjeg sadržaja pepela u jalovini se dobija spajanjem ovih tačaka (gornji desni rubovi histograma).

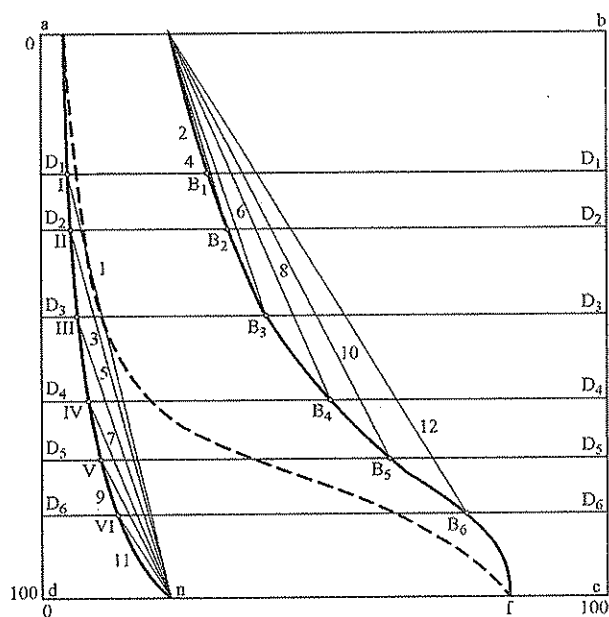
Ova kriva se takođe može konstruisati metodama nacrtna geometrije, kao što je dato na sl.7.30 odnosno sl. 7.31.

④ **Kriva gustina raslojavanja** pokazuje zavisnost između masenih udela frakcija koje plivaju odnosno frakcija koje tonu i gustina raslojavanja. Kriva se obrazuje iz podataka datih u kolonama 1 i 3.

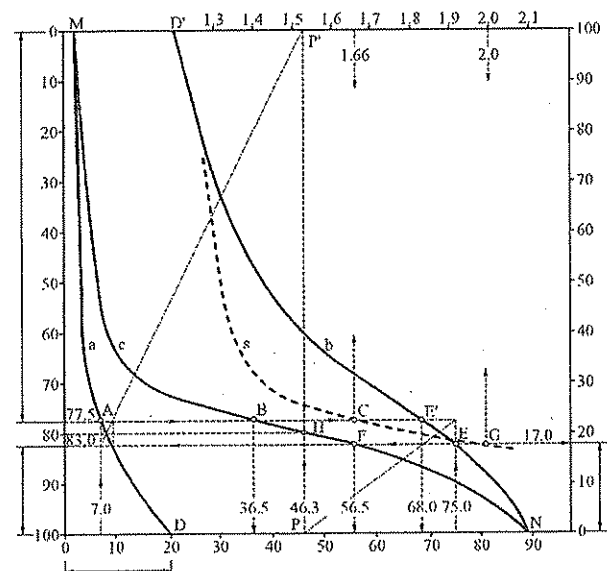
Na nultu liniju masenog iskorišćenja nanosi se skala (na proizvoljnom mestu), koja počinje sa najmanjom gustinom raslojavanja datog uglja, a nadalje, u jednakim razmacima nanose se ostale gustine raslojavanja. Iz tačaka na skali koje odgovaraju gustinama raslojavanja

uglja povlače se prave linije, paralelne ordinati, do preseka sa linijama koje označavaju masena iskorišćenja pojedinih frakcija. Kriva gustina se dobija spajanjem ovih tačaka presecanja.

Krive čišćenja uglja koriste se za izradu bilansa čišćenja uglja, odnosno, dobijanja podataka o kvalitetu i masenom iskorišćenju proizvoda - ČU i J ili ČU, M i J, koji mogu da se očekuju primenom gravitacijske koncentracije. Primer grafičkog prikazivanja P-T analize nekog rovnog uglja, kao i način očitavanja neophodnih podataka za bilans čišćenja dat je na slici 7.32. Pri ovome ne treba gubiti iz vida da rezultati dobijeni Pliva-Tone analizom u stvari prikazuju sastav jednog uglja i da se analiza raslojavanja uglja u frakcije rastućih gustina izvodi u idealnim uslovima z a razliku od industrijskih, pogonskih procesa, pa se masena is-



Sl.7.31 Geometrijski način konstrukcije krive srednjeg sadržaja pepela u jalovini (frakcije koje tonu), na osnovu podataka za dobijanje krive srednjeg sadržaja pepela u čistom uglju – redosled označen brojevima.



Sl.7.32 Krive čišćenja uglja po H-R metodu, i način očitavanja rezultata

Tablica 7.27 Tabela prikaz Pliva-Tone analize kolubarskog lignita Polje D, klase krupnoće -60+30 mm (po metodi Mayer-a)

Gustine Raslojavanja u g/cm ³	Maseni udeo frakcije, M, %	Sadržaj pepela, p, %	M x p	↓Σ M x p	Koordinate krive M	
					Ordinata ↓Σ M, %	Apscisa p' $\sum \left[\frac{M_i \cdot p_i}{100} \right]$
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
<1,05	14,46	4,30	62,82	62,82	14,46	0,63
1,05-1,10	14,01	4,90	68,65	131,47	28,47	1,31
1,10-1,15	24,93	5,40	134,62	266,09	53,40	2,66
1,15-1,17	9,40	8,70	81,78	347,87	62,80	3,48
1,17-1,20	6,82	12,20	83,20	431,07	69,62	4,31
1,20-1,30	9,31	18,60	173,17	604,24	78,93	6,04
1,30-1,40	5,15	38,30	197,25	801,49	84,08	8,01
1,40-1,50	3,76	55,80	209,81	1011,30	87,84	10,11
>1,50	12,16	76,10	925,38	1936,68	100,00	19,36
Ulaz:	100,00	19,37	1936,68	—	—	—

korišćenja i kvaliteti pojedinih proizvoda koji se dobijaju na bazi podataka P-T analize mogu smatrati teoretskim. Teoretski bilanski čišćenja uglja predstavljaju osnovu za sagledavanje mogućnosti čišćenja jednog uglja od jalovine, primenom gravitacijske koncentracije.

7.2.16 PRIKAZIVANJE REZULTATA PLIVA-TONE ANALIZE PO MAYER-U

Po izvršenom raslojavanju uglja, u frakcije rastućih gustina, određuju se maseni udeli frakcija u ispitivanom uglju, a koje se zatim hemijski analiziraju na sadržaj ukupnog pepela. Dobijene vrednosti se unose u tablicu i izračunavaju ostali potrebni elementi za crtanje krivih čišćenja uglja.

Primer tabličnog prikazivanja rezultata Pliva-Tone analize po Mayer-u dat je u tablici 7.27. Prve četiri kolone identične su ranije objašnjenom postupku prikazivanja po metodu Henry-Reinhardt-a, dok poslednje dve predstavljaju vrednosti koordinatnih tačaka za dobijanje krive M čišćenja uglja.

Vrednosti za ordinatu dobijaju se jednostavnim sabiranjem masenih udela frakcija koje plivaju, sa porastom gustina raslojavanja uglja. Vrednosti za apscisu dobijaju se računski na sledeći način:

$$100 : M_1 = p_1 : p_1'$$

odnosno

$$\frac{p_1'}{M_1} = \frac{p_1}{100}$$

odakle sledi vrednost prve ordinate

$$p_1' = \frac{M_1 \cdot p_1}{100}$$

A koordinate prve tačke A krive M dobijamo

$$A - \begin{cases} p_1' = \frac{M_1 \cdot p_1}{100} \\ M_1 \end{cases}$$

gde su:

M_1 - maseni udeo frakcije koja pliva na gustini manjoj od ρ_1 ;

p_1 - sadržaj pepela u frakciji koja pliva na gustini $< \rho_1$;

p_1' - veličina apscise za prvu tačku krive.

Vrednost za apscisu druge tačke biće:

$$p_2' = \frac{M_1 \cdot p_1 + M_2 \cdot p_2}{100}$$

A koordinate druge tačke B krive M dobijamo, analogno prvoj, iz

$$B - \begin{cases} p_1' + p_2' = \frac{M_1 \cdot p_1}{100} + \frac{M_2 \cdot p_2}{100} \\ M_1 + M_2 \end{cases}$$

Odnosno vrednost apscise treće tačke

$$p_2' = \frac{M_1 \cdot p_1 + M_2 \cdot p_2 + M_3 \cdot p_3}{100}$$

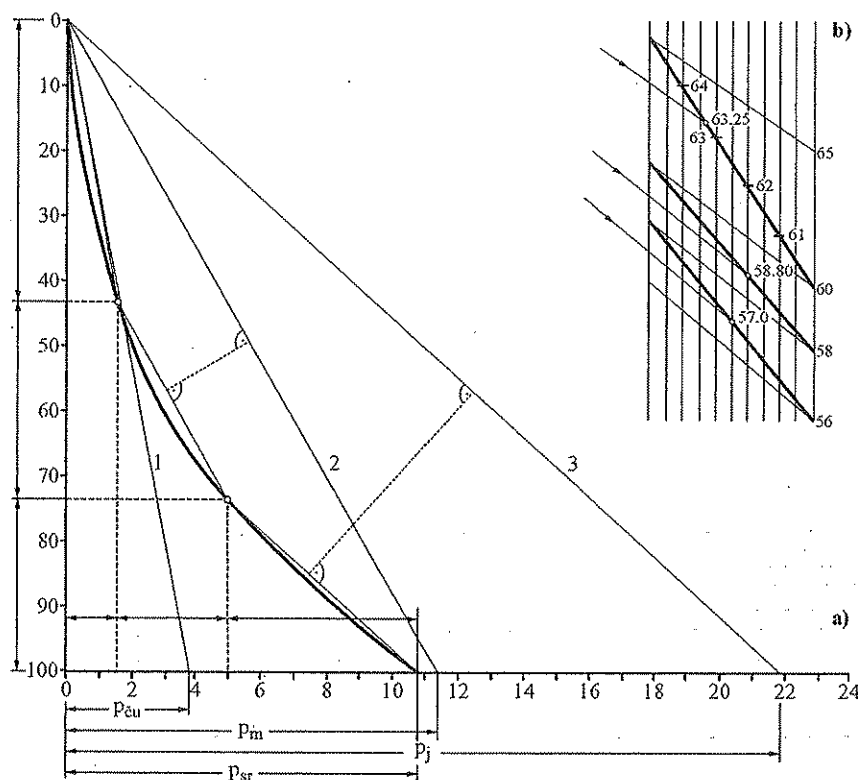
A koordinate treće tačke C krive M dobijamo iz

$$C - \begin{cases} p_1' + p_2' + p_3' = \frac{M_1 \cdot p_1}{100} + \frac{M_2 \cdot p_2}{100} + \frac{M_3 \cdot p_3}{100} \\ M_1 + M_2 + M_3 \end{cases} \quad i$$

tako redom za ostale frakcije koje plivaju.

Na osnovu dobijenih podataka, prikazanih u tablici 5.27., konstruišu se krive čišćenja uglja po Mayer-u i to:

- ♦ kriva M čišćenja uglja i
- ♦ kriva gustina.



Sl.7.33 Postupak konstrukcije krive čišćenja uglja po Majeru

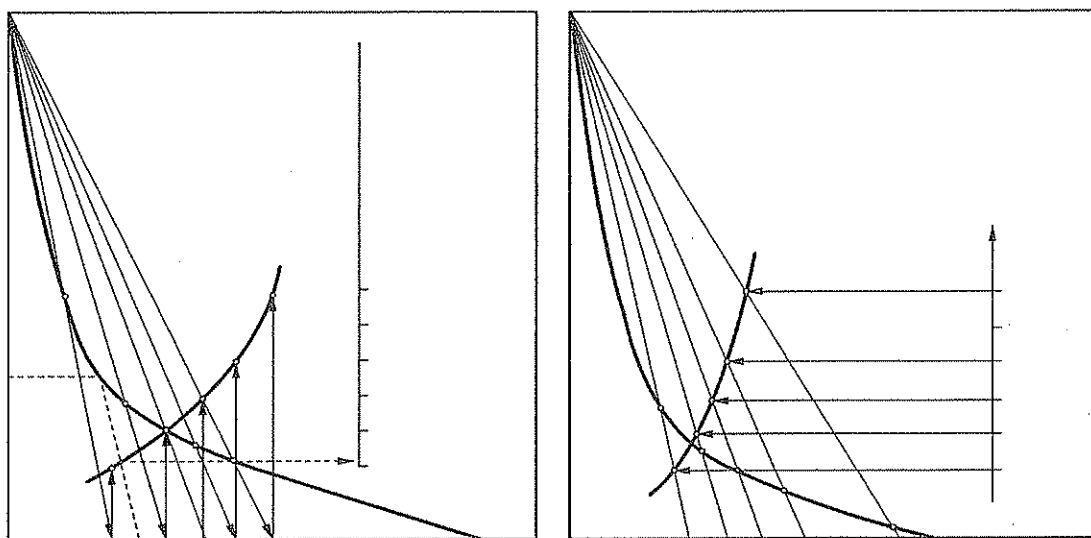
① **Kriva M** čišćenja uglja predstavlja vektorski vid prikazivanja Pliva-Tone analize. Za konstrukciju ove krive Mayer (1953.) je predložio poseban obrazac. Ordinata na obrascu može biti dužine 25 cm odnosno da 10% masenog udela frakcije koja pliva bude označeno na crtežu sa 25 mm. Na osi apscise 1 % pepela odgovara dužini od 10 mm i sve tako do 35 % sadržaja pepela, a preko ove vrednosti sadržaj pepela se nanosi na prelomljenu osu, na vertikalu, povučenu iz krajnje tačke na apscisi, paralelno ordinati. Podeoci na ovom odsečku ose dobijaju se spajanjem tačke nultog iskorišćenja, frakcija koje plivaju, sa odgovarajućim tačkama, sadržaja pepela, označenim na produženoj apscisi.

Kriva čišćenja uglja konstruiše se prema podacima izračunatim u poslednje dve kolone tablice, odnosno

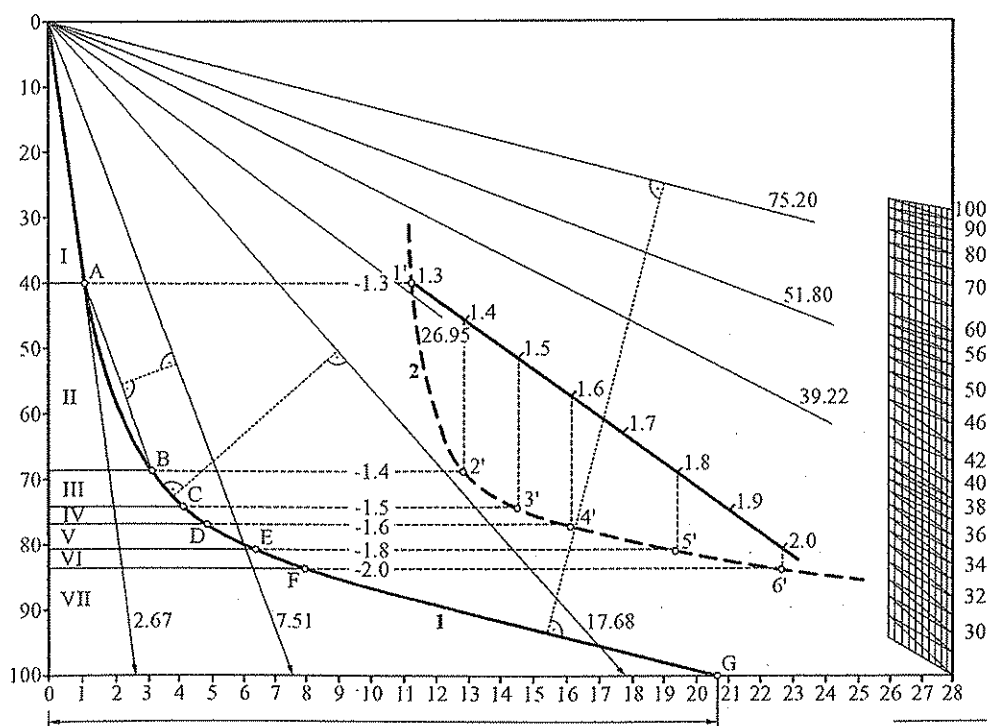
povlačenjem linija masenih iskorišćenja pojedinačnih frakcija koje plivaju na koje se nanose vrednosti za sadržaj pepela u tim frakcijama ($p_1', p_2' \dots p_n'$).

② **Kriva gustina** može se konstruisati na dva načina i to: po prvoj varijanti, kriva predstavlja zavisnost između masenih udela frakcija koje plivaju i gustina raslojavanja (Sl.7.34 a), a po drugoj, zavisnost između sadržaja pepela u frakcijama koje plivaju i gustina raslojavanja (Sl.7.34 b).

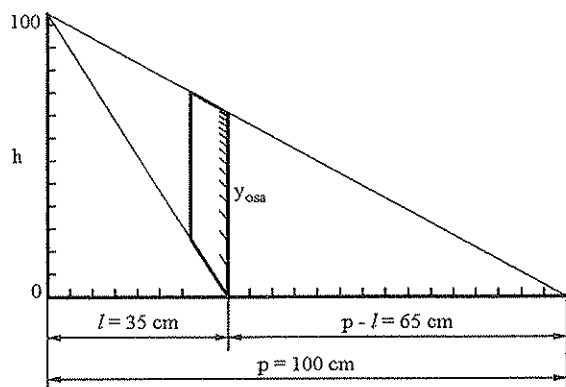
Krive čišćenja uglja po Mayer-u koriste se za očitavanje podataka potrebnih za izračunavanje bilansa čišćenja jednog uglja, bilo da se iz uglja izdvajaju dva proizvoda (ČU i J) ili tri proizvoda (ČU, M i J). Način očitavanja ovih podataka prikazan je na datim primerima, koristeći krive čišćenja uglja date na slici 7.35.



Sl.7.34 Prikaz mogućih postupaka konstrukcije krive gustina raslojavanja kod Majerovog metoda; a--zavisnost između masenih udela frakcija koje plivaju i gustina raslojavanja; b--zavisnost između sadržaja pepela u frakcijama koje plivaju i gustina raslojavanja.



Sl.7.35 Izgled i način očitavanja podataka čišćenja rovnog uglja po postupku Majera.



$$y = 250 \cdot \left(1 - \frac{l}{p}\right); \quad y_{\max} = 250 \cdot \left(1 - \frac{35}{100}\right) = 162,5 \text{ mm}$$

Sl.7.36 Postupak pri dobijanju podataka za "prelomljeni" y osu o sadržaju pepela, računskim putem prema jednačinama za y -osu i $y_{\max}$ (vertikalni prelomljeni deo).

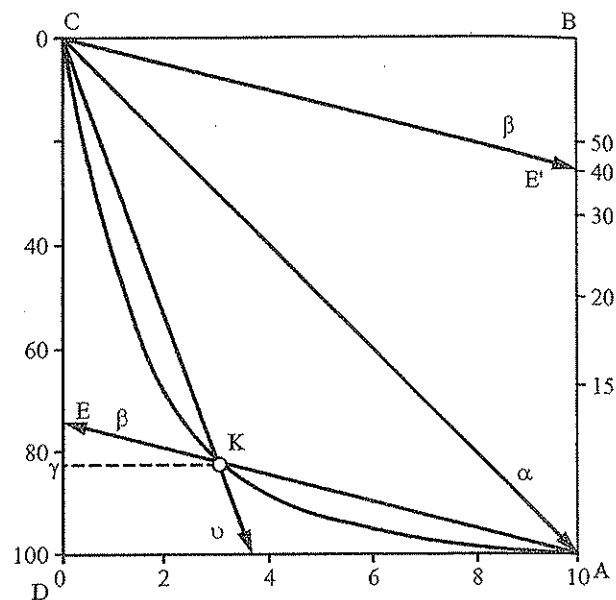
7.2.17 PLIVA-TONE ANALIZA SIROVINA METALIČNIH MINERALA PO POSTUPKU MAYER-A

Nesumnjiva primenljivost, koja proizilazi iz jednostavnosti pri korišćenju Mayer-ove krive čišćenja (kriva M) kod pliva-tone analize uglja, navodi nas na pomisao da je isto tako možemo koristiti i pri ispitivanju mogućnosti izdvajanja predkoncentrata kod rude metalnih minerala. Odnosno, drugim rečima, moguće je uspešno izvesti "potapanje" sirovine metalnih minerala u teške tečnosti a rezultate analize prikazati krivom M. Pokazalo se, međutim, da u tom slučaju grafik krive M u svom prvobitnom obliku ne ispunjava na zadovoljavajući nači svoj zadatak, pošto se pri pliva-tone analizi ruda metalnih minerala operiše sa znatno većim brojem spoljašnjih faktora, nego što je to slučaj pri ispitivanju mogućnosti čišćenja uglja. Osim sadržaja metala (rudnih minerala) u jalovini, koja odgovara sadržaju pepela u čistom uglju ("koncentratu uglja"), grafik treba da nam pruži mogućnost preciznog očitavanja sadržaja metala (minerala) u predkoncentratu (koncentratu) kao i određivanja udela metala odnosno iskorišćenja kao i gubitaka metala u jalovini. U prvobitnoj primeni u oblasti čišćenja uglja grafik krive M ne tretira i ne razmatra ove zahteve. Unošenjem nekih izmena i dopuna, ne samo da se otklanjaju ti nedostaci, već se i proširuje mogućnost primene krive M. Grafik primenjen na odgovarajući način može da se primeni i prilikom pliva-tone analize i ispitivanja mogućnosti izdvajanja predkoncentrata, kod siromašnih ruda nekih metalnih minerala. Ukoliko sirovine koje se ispituju imaju ukupni sadržaj metala ispod 1 % grafički prikaz krivom M ne daje dovoljno precizne podatke.

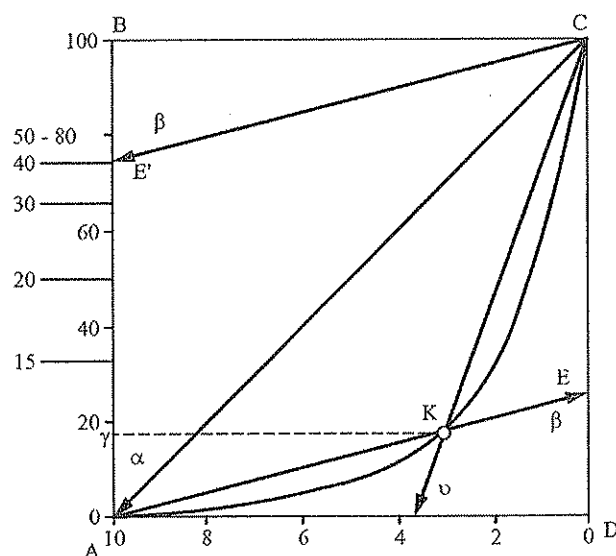
Kriva Mayer-a, zahvaljujući mogućnosti, da se na jednom grafiku prikaže nekoliko krivih i mogućnosti njihove zamene jednom sumarnom krivom, omogućuju da se lako izvede analiza ispitivanja pri potapanju nekoliko različitih uzoraka zajedno sa različitim masenim udelima ispitivanih minerala, tako da se kod pliva-tone analize polimetalnih ruda dobija čitav niz pokazatelja karakterističnih za proces selektivnog izdvajanja odnosno koncentracije minerala.

Pliva-tone analiza po postupku Mayer-a za bogate rude metalnih minerala

Na grafiku krive M koja prikazuje rezultate čišćenja uglja, skala masene zastupljenosti (ordinata) ide odozgo nadole sa nultom tačkom masenog iskorišćenja u tački C (Sl.7.37).



Sl.7.37 Kriva M čišćenja uglja.

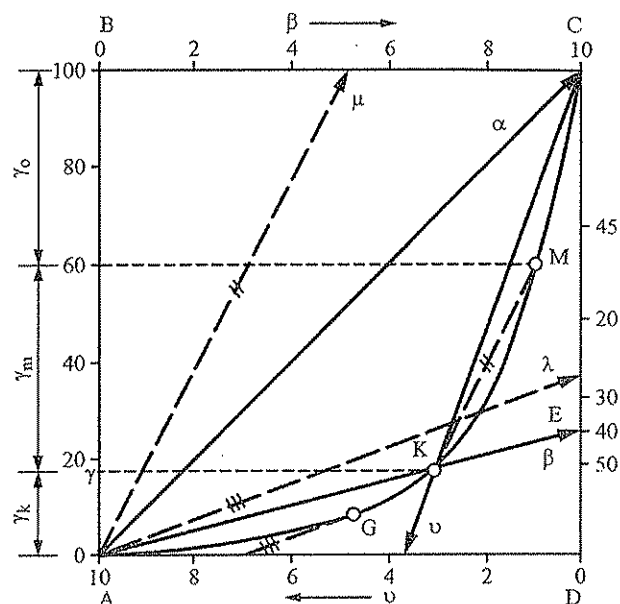


Sl.7.38 Kriva M čišćenja (pretkoncentracija) ruda metalnih minerala.

Zrak CK određuje sadržaj pepela u čistom uglju (koncentratu uglja), koji se očitava na skali nanesej na pravou DA, sa nultom tačkom u tački D, zrak AE, pak, određuje sadržaj pepela u jalovini; taj sadržaj se očitava na skali prave AB, koja je produžetak skale DA, pri čemu treba nacrtati zrak CE', paralelno sa zrakom AE. Kod pliva-tone analize ruda metala zgodnije je rotirati ceo grafik za 180° , oko ose AB, te izabrati nultu tačku skale masene iskorišćenosti u dnu grafika, ali ipak u tački A. Grafik će izgledati kao što je prikazano na Sl. 7.38. Skala sadržaja metala (ili minerala) u proizvodima, frakcijama koje tonu, nalazi se tada na pravou AD i raste sa desna na levo, a njeno produženje na pravou AB

odozgo na gore, sa nultom tačkom iskorišćenja u tački D. Prilikom razmatranja postupka čišćenja uglja, sadržaj pepela u jalovini nema primarni značaj dok je kod pliva-tone analize ruda metala sadržaj metala u koncentratu od velikog značaja. Sadržaj se određuje, kako je već pomenuto, povlačenjem zraka CE' paralelno sa zrakom AE (Sl. 7.38).

Prave AE i CE' koje određuju zrak β su paralelne, dok su odsečki AE' i CE' međusobno jednaki. Ako je nulta tačka vrednosti β u tački B i ako se produži skala prave BC na pravu CD, tada će zrak AE pokazati na pravoj CD vrednost β u tački E. Treba ipak razdvojiti skale v i β ; skalu v odrediti na pravoj AD sa nultom tačkom u tački D, a skalu β na pravama BC i CD sa nultom tačkom u tački B (Sl. 7.39). Pošto već imamo izračunate koordinate tačaka krive M, tačke treba nanositi na grafik služeći se skalom na pravama BC i AB. Sadržaj metala u meuproizvodu ne može se očitati direktno, treba ucrtati zrak μ paralelno sa KM, vrednost μ očitava se na skali prave BC ili CD (Sl. 7.39.).



Sl. 7.39 Prikaz krive M pliva-tone analize sirovine metalnih minerala.

7.3 LITERATURA

1. Berlinskii, A. I., 1975: Razdelenie mineralov, Nedra, Moskva.
2. Dekrach, V.G., Kopychev, P.A., 1956: Spetsial'nye metody obogashcheniia poleznykh iskopaemykh; Metallurgizdata, Moskva.
3. Fomenko, T.G., Butovetskii, V.S., Pogartseva, E.M., 1978: Issledovanie uglei na obogatimost', Nedra, Moskva.
4. Gaidnraikh, G., 1962: Otsenka promyshlennykh rezul'tatov obogasheniia poleznykh iskopaemykh; Moskva.
5. Ignjatović, R., 1983: Fizičke metode koncentracije mineralnih sirovina. – Tehnički fakultet Bor, Bor.
6. Khan, G.A., 1979: Oprobovanie i kontrol' tekhnologicheskikh protsessov obogashcheniia; Nedra, Moskva.
7. Kozak, J., Cagaš, Z., 1965: Hodnoceni upravitelnosti a spůsobu upravy nerostnykh surovin. – SNTL/SVTL, Praha.
8. Mitrofanov, S.I., Barskii, L.A., Samygin, V.D., 1974: Issledovanie poleznykh iskopaemykh na obogatimost', Nedra, Moskva.
9. Sagradian, A.L., Cuvorovskaia, N.A., Krangachev, B.G., 1983: Kontrol' tekhnologicheskogo protsessa flotatsionn'ikh fabrik, Nedra, Moskva.
10. Sokolov, V. G., 1962; Krivye obogatimosti uglei, Gosgortehizdat, Moskva.
11. Stepinski, W., 1964: Wzbogacenie grawitacyjne. – Panstwowe wydawnictwo naukowe, Warszawa.

SADRŽAJ GLAVE 8

8.1 MOGUĆNOSTI SELEKTIVNOG IZDVAJANJA MINERALA NA OSNOVU MAGNETSKIH OSOBINA	291
8.1.1 Magnetičnost minerala i njihovo odvajanje	291
8.1.2 Osnovni pojmovi o magnetskom polju i magnetskim svojstvima	292
8.1.3 Osobine feromagnetičnih minerala	294
8.1.4 Osobine paramagnetičnih minerala	294
8.1.5 Uticaj temperature na promenu magnetskog susceptibiliteta	295
8.1.6 Laboratorijski uređaji za separaciju jako i slabo magnetičnih minerala	296
8.1.7 Potkovičasti magnet	296
8.1.8 Eklipsa ručni magnet	296
8.1.9 Davis-ov magnetski analizator	297
8.1.10 Frantz-ov izodinamički magnetni analizator	298
8.1.11 Magnetski separator (analizator) sa bubnjem	300
8.2 MAGNETOHIDRODINAMIČKO I MAGNETOHIDROSTATIČKO IZDVAJANJE MINERALA	301
8.2.1 Magnetohidrodinamički metod (MHD) razdvajanja minerala	301
8.2.2 Magnetohidrostatički metod (MHS) razdvajanja minerala	301
8.3 MOGUĆNOSTI SELEKTIVNOG IZDVAJANJA MINERALA NA OSNOVU ELEKTRIČNIH OSOBINA	303
8.3.1 Priprema sirovine za električnu separaciju	303
8.3.2 Zagrevanje i uticaj vlažnosti na proces separacije	304
8.3.3 Priprema površina čestica - obrada reagensima	304
8.4 LITERATURA	306

GLAVA 8

8.1 MOGUĆNOSTI SELEKTIVNOG IZDVAJANJA MINERALA NA OSNOVU MAGNETSKIH OSOBINA

8.1.1 MAGNETIČNOST MINERALA I NJIHOVO IZDVAJANJE

Poznato je da sve supstance, a prema tome i mineralne vrste, poseduju u izvesnoj meri magnetske osobine, što znači da su svi minerali manje ili više magnetični.

Prvi primeri korišćenja magnetskih svojstava magnetita za njegovo odvajanje od kasiterita, uz pomoć ručnog magneta, pominje već *G. Bauer-Agricola* (1494-1555.). Industrijska primena ovoga metoda pripreme, pri koncentraciji ruda sa magnetitom, pominje se 1865. godine, a 60 godina kasnije postupak se već koristi u pripremi ruda plemenitih metala, dok se 1940. godine uvodi i u pripremu ruda mangana. Primena saznanja moderne fizike u oblasti magnetske koncentracije znatno ubrzava njen razvoj i svrstava je u progresivnije procese u PMS. Ovu činjenicu potvrđuje i *G. Hills*, koji ističe, da od 25 do danas poznatih metoda razdvajanja (koncentracije) minerala, samo su 4 pogodbe za pripremu sirovina koje su sitnije od 10 μm , a sa visokogradientnim magnetskim separatorom mogu se izdvajati čestice manje od 5 μm .

Magnetska koncentracija kojom se izdvajaju jako magnetični minerali od nemagnetičnih minerala može da se izvede šipkastim ili potkovičastim magnetom. Minerali koji imaju vrlo bliske magnetske osobine mogu biti razdvojeni uz pomoć složenih uređaja kao što su izodinamički koncentratori. Oni mogu biti takođe iskorišćeni za merenje magnetskih susceptibiliteta pojedinih mineralnih zna. Ukoliko dva minerala imaju istu (ili vrlo blisku) vrednost magnetske permeabilnosti, takođe, ih je moguće razdvojiti magnetskim metodama, ako se magnetske osobine jednog minerala mogu menjati dok drugi mineral ostaje nepromenjen. Hematit i kvarc su obično nemagnetični ali oni se mogu sigurno razdvojiti magnetskim metodama nakon što se podvrgnu magnetizirajućem prženju (naime, žarenjem hematita na viso-

kim temperaturama u redukcionoj atmosferi, hematit prelazi u jako magnetični mineral magnetit).

Detaljne informacije o magnetskim osobinama minerala teško je dobiti iz literature jer su ove osobine u velikoj meri uslovljene prisustvom i najmanjih magnetičnih nečistoća. Prema tome magnetske osobine minerala u sklopu bilo kog rudnog tela, odnosno sirovine moraju biti merene, a rezultati ovih merenja imaju važnost samo za tu sirovinu. Prave magnetske osobine minerala, kao na primer kasiterita, mogu biti maskirane prisustvom sasvim tanke prevlake od nečistoća kao što je oksid gvožđa; ovakve prevlake najčešće se uklanjaju potapanjem zrna u odgovarajući reagens (luženje) ili atricijom, odnosno pranjem i međusobnim trenjem tokom takvog mešanja u bubnjevima ili mlinovima sa malom brzinom obrtanja pri čemu i dolazi do abrazije omoćaća.

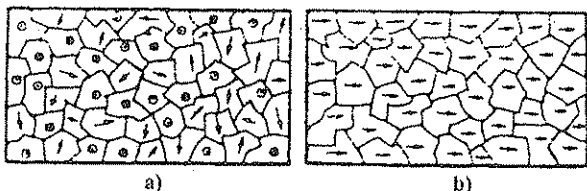
Različiti molekuli, koji čine mnogobrojne mineralne vrste, mogu da imaju permanentni magnetni moment ili pak da momenat može da bude indukovan magnetskim poljem. Kako je jedan od osnovnih zadataka "metoda" međusobno razdvajanje, na različite načine, vezanih mineralnih vsta, magnetsko razdvajanje se zasniva na razlikama u osetljivosti minerala prema magnetskim silama, odnosno na razlikama u ponašanju minerala u magnetskom polju. Materije unete u polje magneta podvrgavaju se njegovom delovanju, koje se ogleda u namagnetisanju materije, odnosno obrazovanju unutrašnjeg magnetskog polja u njima. Obrazovanje unutrašnjeg polja u materijama zavisi od njihove atomske strukture. U zavisnosti od atomske strukture, sve materije se, pa tako i minerali, u pogledu obrazovanja unutrašnjeg polja dele na: dijamagnetike i paramagnetike.

□ **DIJAMAGNETICI** su materije u kojima se unutar atoma orbitalni momenti svih elektrona potiru (kompenzuju) i u odsustvu spoljašnjeg magnetskog polja, magnetski momenti svih atoma su ravni nuli. Unoše-

njem materije u spoljašnje magnetsko polje, dolazi do izmene u orijentaciji orbitalnih momenata i do pojave slične polarizaciji dielektrikuma, čija je posledica pojava unutrašnjeg magnetskog polja, istog smera kao i u spoljašnjem polju. Ovo unutrašnje magnetsko polje, indukuje u svojoj okolini magnetsko polje koje je suprotnog smera - kočeće polje i smanjuje intenzitet spoljašnjeg polja, odbijajući linije silnica. U homogenom spoljašnjem magnetskom polju, dijamagnetične materije se orijentišu upravno na magnetske linije, a u nehomogenom se kreću u pravcu slabljenja polja, odnosno odbijaju se od magnetna.

□ **PARAMAGNETICI** su materije u kojima se unutar atoma ne potiru svi orbitalni magnetski momenti i atomi poseduju izvestan sumarni magnetski momenat. Usled haotične orijentacije atomskih magnetskih momenata isti se kompenzuju i u odsustvu spoljašnjeg polja materije ne pokazuju magnetske osobine. Unošenjem u spoljašnje magnetsko polje materije se namagnetišu, usled orijentacije atomskih magnetskih momenata u pravcu magnetskog polja, odnosno obrazovanja unutrašnjeg polja istog pravca kao i spoljašnje polje, a intenziteta u zavisnosti od broja orijentisanih magnetskih momenata. Linije silnica spoljašnjeg polja prolazeći kroz paramagnetične minerale se sakupljaju i jačina spoljašnjeg magnetskog polja raste. Paramagnetične materije se dele na: slabomagnetične i praktično nemagnetične.

□ **FEROMAGNETICI** predstavljaju posebnu grupu paramagnetika i odlikuju se viškom od maksimum pet nekompensovanih orbitalnih magnetskih momenata unutar svakog atoma, koji stvaraju jake sumarne momente, međusobno se ne potiru, već obrazuju domene, sfere uticaja ili oblasti sa paralelnim magnetskim momentima.



Sl.8.1 Orijentacija domena

To su grupe atoma koji su složeni jedan pored drugog tako da magnetski momenti elektrona u njima zadržavaju paralelnu orijentaciju u istom smeru. Domeni sadrže oko 10^{15} atoma i nisu direktno vezani za veličinu kristala. Kristalna struktura je uslov za feromagnetizam, te se domeni mogu formirati samo pri kristalnom stanju tela. Pošto magnetski momenti elektrona u domenu imaju paralelnu orijentaciju i međusobno se sabiraju, dobija se rezultujuće magnetski momenat domena. Tako se ceo domen može smatrati kao mali permanentni magnet. Kada se feromagnetsko telo ne nalazi u spoljašnjem magnetskom polju, magnetski momenti domena su približno jednako orijentisani u svim pravcima (Sl.8.1 a). Tada je ukupno rezultujuće polje jednako nuli. Kada se feromagnetsko telo unese u spoljašnje magnetsko polje, na svaki domen će delovati spregovi koji teže da magnetski momenat domena orijentiše u pravcu polja. Ako je spoljašnje polje dovoljno jako, svi domeni će biti orijentisani u pravcu polja (Sl.8.1 b). Tada rezultujuće polje svih domena neće imati vrednost

nula, već značajnu vrednost koja može biti više puta veća od osnovnog polja koje vrši orijentaciju domena.

Grupe od 10^{12} - 10^{15} atoma obrazuju oblasti koje predstavljaju elementarne magnete, haotično raspoređeni. U odsustvu spoljašnjeg magnetskog polja materija ne poseduje unutrašnje polje, jer se sfere uticaja međusobno potiru. U spoljašnjem magnetskom polju domeni se orijentišu obrazujući jako unutrašnje polje, koje intenzivno pojačava spoljašnje magnetsko polje.

8.1.2 OSNOVNI POJMOVI O MAGNETSKOM POLJU I MAGNETSKIM SVOJSTVIMA

Ako je:

H - jačina magnetnog polja

I - intenzitet magnetizacije koju indukuje polje u datoj sredini ili magnetni moment po jedinici zapremine;

onda je

B - veličina magnetske indukcije u datoj sredini data je izrazom:

$$B = 4\pi \cdot I + H$$

u vakumu je $B = H$ a u svakoj drugoj sredini $B = \mu H$ gde je:

μ - permeabilnost (propustljivost) sredine ili merilo težnje da magnetne linije sila prođu kroz datu sredinu, u poređenju sa tom težnjom u vakumu ili vazduhu.

$$\mu \cdot H = 4\pi \cdot I + H$$

$$\mu = \frac{4 \cdot \pi \cdot I}{H} + \frac{H}{H}$$

$$\mu = \frac{4 \cdot \pi \cdot I}{H} + 1$$

Magnetska svojstva minerala se u praksi opisuju i preko zapreminskog magnetskog susceptibiliteta (osetljivosti) ili magnetskog susceptibiliteta po jedinici zapremine (χ) (sposobnost namagnetisanja).

χ - predstavlja odnos između intenziteta I (magnetski moment po jedinici zapremine) koji indukuje magnetsko polje jačine H u datoj sredini.

$$\chi = \frac{I}{H}$$

zamenom u predhodnu jednačinu

$$\mu = 4 \cdot \pi \cdot \chi + 1$$

magnetni permeabilitet (propustljivost).

Postoji i definicija magnetskih svojstava minerala i preko specifičnog magnetskog susceptibiliteta (χ_s), koji se dobija deljenjem zapreminskog magnetskog susceptibiliteta sa gustinom minerala ρ

$$\chi = \frac{I}{H} \rightarrow \frac{\chi}{\rho} = \frac{I}{H} \rightarrow \chi_s = \frac{I}{H} \cdot \rho$$

$$\mu = \frac{4 \cdot \pi \cdot I}{H} \cdot \rho + 1 \rightarrow \mu = 4 \cdot \pi \cdot \chi_s \cdot \rho + 1$$

Prema tome da rezimiramo sa pregledom osnovnih veličina.

Veličina	Simbol i ime	Stare jedinice van upotrebe	Faktor pretvaranja
Magnetska indukcija, B	tesla, T	gaus	10^{-4}
Magnetizirajuće polje, H	A/m	ersted	$10^3/4\pi$
Magnetska permeabilnost, μ	henri/metar, H/m	-	$4\pi \cdot 10^{-7}$
Relativna permeabilnost, μ_r	bezdimenziona	-	1
Magnetski susceptibilitet, χ	bezdimenziona	-	4π
Specifični susceptibilitet, χ_s	m ³ /kg	cm ³ /g	$4\pi \cdot 10^{-3}$

Primer: 1 ersted = $10^3 / 4\pi \approx 79,6$ A/m
1 gaus = 10^{-4} tesla
1000 gausa = 0,1 tesla

Osnovna podela minerala u pogledu obrazovanja unutrašnjeg magnetskog polja je na dijamagnetične, paramagnetične, odnosno feromagnetične minerale, i u pogledu drugih magnetskih svojstava izgleda ovako:

DIJAMAGNETIČNI (ne magnetični) minerali imaju:

- permeabilnost (propustljivost) $\mu < 1$ (koeficijent koji zavisi od osobina materije i jačine magnetskog polja B, $\mu = B/H$ ili $\mu = 4\pi\chi + 1$). B-veličina magnetske indukcije, broj linija silnica koje prolaze kroz 1 cm² površine; a
- magnetski susceptibilitet (osetljivost) ili sposobnost namagnetisanja $\chi < 1$ odnosno $\chi = (\mu - 1)/4\pi$.

PARAMAGNETIČNI (slabo magnetični) minerali imaju:

- permeabilnost $\mu > 1$ (ili nešto veću); a
- magnetski susceptibilitet - magnetsku osetljivost $\chi > 0$.

FEROMAGNETIČNI (jako magnetični) minerali, kao posebna grupa paramagnetika, imaju:

- permeabilnost $\mu \gg 1$ ili tačnije $> 10^3$, a
- magnetski susceptibilitet (osetljivost) ili sposobnost namagnetisanja $\chi = 10^2$.

Postoji i *tehnološka klasifikacija minerala* - prema izraženosti magnetskih osobina - prema veličini *specifičnog magnetskog susceptibiliteta* (χ_s) (Tab.8.1):

JAKO MAGNETIČNI MINERALI magnetit, maghemit, franklinit, pirotin kod kojih je specifični magnetni susceptibilitet - osetljivost veća $\chi > 3,8 \cdot 10^{-5}$ m³/kg (u SI jedinicama, dok se u relativno starijim publikacijama navode veličine od $\chi > 3 \cdot 10^{-3}$ cm³/g, u CGS jedinicama) i izdvajaju se u relativno slabom magnetskom polju, jačine do $H < 120$ kA/m (u SI jedinicama). Magnetska svojstva minerala zavise od krupnoće zrna. Smanjenjem krupnoće zrna magnetita opada specifični magnetni susceptibilitet. To može, u nekim slučajevima, da bude jedan od uzroka što sitna zrna magnetita odlaze u jalovinu prilikom magnetske koncentracije sirovine. Magnetski susceptibilitet sraslih zrna, između jako i slabo magnetičnih do nemagnetičnih minerala, zavisi praktično od udela jako magnetičnih minerala u sraslim zrnima. Pri teoretskom razmatranju veličine zapreminskog magnetskog susceptibiliteta sraslih zrna od zapreminskog udela magnetita, treba analizirati i uticaj oblika nemagnetičnih uklopaka u sraslim zrnima i njihov položaj u odnosu na silu magnetnog polja. Prema tome, proizilazi da veličina zapreminskog magnetskog susceptibiliteta nije direktno srazmerna udelu magnetita u sraslim zrnima, već da je i nešto veća i da za jedan isti zapreminski udeo magnetita u sraslim zrnima, veličina magnetskog susceptibiliteta nije ista, već zavisi od oblika i položaja uklopaka u odnosu na silu magnetnog polja. Na veličinu magnetskog susceptibiliteta sraslih zrna ima uticaja, pored udela magnetita u sraslim zrnima, i jačina magnetskog polja.

Tablica 8.1 Klasifikacija minerala po magnetskim svojstvima

Jako magnetični	Srednje magnetični	Slabomagnetični	Nemagnetični
Elementarno gvožđe	Amfiboli (tamni)	Amfiboli (svetli)	Azurit, aksinit
Franklinit	Biotit	Granati (svetli)	Andaluzit
Magnetit	Volframit	Monacit	Antimonit, apatit
Titanomagnetit	Hematit	Pirokseni (svetli)	Arsenopirit
Pirotin	Ilmenit	Sfen	Auripigment
Platina-mag.	Limonit	Turmalin	Barit, beril
	Pirokseni (tamni)	Halkopirit	Braunit, brukit
	Piroluzit	Spinel (svetli)	Vezuvijan, galenit
	Psilomelan		Vulfenit, zlato
	Turmalin (tamni)		Kasiterit, kijanit
	Hromit, epidot		Korund, malahit
			Molibdenit, pirit
			Realgar, rutil
			Srebro, siderit
			Smitsonit, sfalerit
			Topaz, torit, fluorit
			Halkozin, ceruzit
			Cirkon, šelit, spinel

Tablica 8.2 Magnetska osetljivost (magnetski susceptibilitet) nekih minerala po Davis-u

Minerali	Formula	Sila privlačenja po Davis-u	
Gvožđe	Fe	100,00	Iako magnetični
Magnetit	Fe ₃ O ₄	40,18	
Franklinit	(Fe,Zn,Mn)O	35,38	
Ilmenit	FeTiO ₃	24,70	
Pirotin	FeS	6,69	
Biotit		3,21	
Siderit	FeCO ₃	1,82	Slabo magnetični
Hematit	Fe ₂ O ₃	1,32	
Rodonit	MnSiO ₃	1,01	
Limonit	Fe ₂ O ₃ · H ₂ O	0,84	
Piroluzit	MnO ₂	0,71	
Kvarc	SiO ₂	0,37	Nemagnetični
Pirit	FeS ₂	0,23	
Kalcit	CaCO ₃	0,03	

□ **SLABO MAGNETIČNI MINERALI** oksidi, hidroksidi i karbonati gvožđa, ilmenit, volframit, granati, biotit i drugi minerali kod kojih je specifični magnetni susceptibilitet - osetljivost $\chi > 7,5 \cdot 10^{-6} + 1,25 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ (u SI jedinicama, dok se u relativno starijim publikacijama navode veličine od $\chi = 6 \cdot 10^{-4} + 10 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$, u CGS jedinicama). Osetljivi su na magnetno polje jačine $H = 800\text{--}1600 \text{ kA/m}$ (u SI jedinicama).

□ **NE MAGNETIČNI MINERALI** (dijamagnetični) minerali imaju specifični magnetni susceptibilitet $\chi < 1,25 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ (u SI jedinicama, dok se u relativno starijim publikacijama navodi veličina $\chi < 10 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$, u CGS jedinicama). Osetljivi su na magnetna polja čija je jačina veća od $H > 1600 \text{ kA/m}$ (u SI jedinicama).

8.1.3 OSOBINE FEROMAGNETIČNIH MINERALA

Minerali kao što su magnetit, franklinit, ilmenit i pirotin ili elementi Fe, Ni, Co, Mn, Cr kao i sintetički FeSi (ferosilicijum), pored mogućnosti relativno lakog namagnetisanja, svi oni – feromagnetici, poseduju još nekoliko osobina:

■ **magnetska indukcija** (B) zavisi od prirode feromagnetika i jačine polja ($B = \mu H$ gde je μ - permeabilitet sredine, H - jačina magnetskog polja), i raste sa povećanjem sadržaja feromagnetičnog elementa u mineralu i sa povećanjem intenziteta magnetskog polja H ;

■ **magnetska permeabilnost** μ (propustljivost) i sposobnost namagnetisanja (magnetna osetljivost $\chi = I/H$) zavise od krupnoće. Sa opadanjem krupnoće ispod $100 \mu\text{m}$ približava se nuli.

■ na permeabilnost i intenzitet namagnetisanja feromagnetika utiče i njihova čistoća: hemijski sastav, sraštavanje i udeo nemagnetične faze u sraslacu;

■ feromagnetični minerali kada se namagnetišu, u spoljašnjem magnetskom polju (kada im se obrazuje unutrašnje polje) nakon prestanka delovanja zadržavaju izvesno namagnetisanje-remanentni magnetizam.

Tablica 8.3 Magnetski susceptibilitet nekih dijamagnetičnih minerala na 20° C

Minerali	Formula	$\chi \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$
Elementi		
Dijamanti	C	6,17
Grafit	C	44,00
Sumpor	α -S	6,09
Srebro	Ag	2,41
Zlato	Au	1,787
Bizmut	Bi	16,80
Sulfidi		
Sfalerit	ZnS	3,27
Molibdenit	MoS ₂	6,05
Antimonit	Sb ₂ S ₃	3,17
Cinabarit	HgS	2,99
Galenit	PbS	4,40
Oksidi		
Voda	H ₂ O	9,07
Kvarc	SiO ₂	6,20
Kuprit	Cu ₂ O	1,76
Kasiterit	SnO ₂	2,33
Karbonati		
Magnezit	MgCO ₃	4,83
Kalcit	CaCO ₃	4,80
Ceruzit	PbCO ₃	2,88
Sulfati		
Anhidrit	CaSO ₄	4,47
Gips	CaSO ₄ · H ₂ O	5,33
Barit	BaSO ₄	3,84
Anglezit	PbSO ₄	2,89
Smitsonit	ZnSO ₄	3,41

8.1.4 OSOBINE PARAMAGNETIČNIH MINERALA

Tu spadaju slabomagnetični minerali kao što su oksidi i karbonati gvožđa i mangana. Pored toga što mogu da se namagnetišu u spoljašnjem magnetskom polju intenziteta $H = 800 - 1600 \text{ kA/m}$, predpostavka je da i kod njih krupnoća zrna i čistoća ima presudni uticaj. Postoji mogućnost da se promenom hemijskog sastava (povećanjem koncentracije feromagnetičnog elementa) deluje na atomsku strukturu a time i paramagnetični minerali postaju pseudo-feromagnetici sa svim osobinama istih. Postupak izvodiv kod: hematita, limonita, siderita kada se prevode u magnetit, a pirit u pirotin prženjem u pećima na $600\text{--}700^\circ \text{C}$. Kako bi stekli određeni uvid, o relativnim odnosima, u narednim tablicama 8.3 i 8.4 dat je izvestan broj minerala, razvrstanih u grupe, zavisno od svog hemijskog sastava, posebno za dijamagnetične minerale a posebno za paramagnetične, sa osnovnim veličinama magnetskog susceptibiliteta. Istovremeno su u tablici 8.5 date vrednosti magnetskog susceptibiliteta nekih minerala nosilaca mineralizacije značajnijih ležišta gvožđa u svetu.

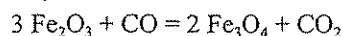
Tablica 8.4 Magnetski susceptibilitet paramagnetičnih minerala na 20° C.

Minerali	Formula	χ (10^{-9} m ³ /kg)
Sulfidi		
Pirit	FeS ₂	0,004 – 0,013
Markasit	FeS ₂	0,004 – 0,013
Halkopirit	CuFeS ₂	0,011 – 0,055
Bornit	Cu ₅ FeS ₄	0,092 – 0,100
Oksidi		
Getit	FeOOH	0,38 – 0,46
Manganit	MnOOH	0,36 – 0,50
Piroluzit	MnO ₂	0,30 – 0,48
Volframit	(Fe,Mn)WO ₄	0,40 – 0,53
Hromit	FeCr ₂ O ₄	0,32 – 0,38
Karbonati		
Siderit	FeCO ₃	1,06 – 1,30
Rodohrozit	MnCO ₃	1,31 – 1,34
Silikati		
Olivin	(Mg,Fe) ₂ SiO ₄	0,11 – 1,26
Biotit		0,05 – 0,98
Granat		0,14 – 0,95
Diopraz	CuSiO ₃ · H ₂ O	0,106 – 0,111
Garnierit	(Ni,Mg)SiO ₃ · xH ₂ O	0,38 – 0,39

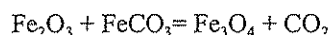
8.1.5 UTICAJ TEMPERATURE NA PROMENU MAGNETSKOG SUSCEPTIBILITETA

REDUKCIONO PRŽENJE MINERALA. Redukciono prženje minerala se koristi pri izmeni α -Fe₂O₃ u feromagnetični proizvod Fe₃O₄ i koristi se kod hematitskih i limonitskih ruda odnosno koncentrata. Prženje treba da se odvija pri takvoj temperaturi i koncentraciji reduktora da bi se obezbedila stabilnost formiranja magnetita. Kao redukciono sredstvo koristi se CO i H₂ iz gasovitih i tečnih odnosno čvrstih goriva. Redukcija počinje pri temperaturi od 600° C a gornja granica je limitirana topljenjem rude (900-1100° C).

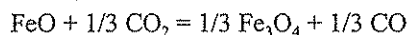
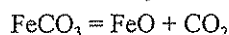
Redukcija oksida gvožđa u magnetičan magnetit pri korišćenju gasova za redukovanje se odvija prema sledećim jednačinama:



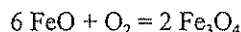
Redukcionim prženjem možemo da povećamo magnetska svojstva i siderita, prema sledećoj jednačini:



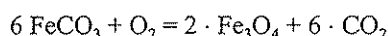
OKSIDACIONO ŽARENJE MINERALA. Koristi se kod prevođenja siderita i pirita u magnetit, pri čemu je odlučujući faktor u ovom procesu optimalna temperatura. Reakcija počinje pri temperaturi većoj od 400° C prema sledećim jednačinama:



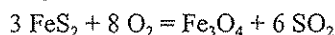
Reakcija oksidacije FeO započinje u slabooksidacionoj atmosferi pri temperaturi od oko 500° C, prema



a odgovarajuća reakcija žarenja siderita je sledeća:



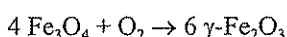
Prženje pirita u oksidacionoj atmosferi se odvija prema jednačini:



Ova reakcija treba da se odvija pri dovoljnoj količini vazduha kako bi mogla da zadovolji stvaranje Fe₃O₄ i SO₂.

REDUKCIONO-OKSIDACIONO ŽARENJE MINERALA. Izvodi se pri temperaturama u rasponu od 220-550° C i ima za zadatak promenu nestabilne modifikacije γ -Fe₂O₃ u stabilni feromagnetični magnetit. Ukoliko se ova promena odvija pri temperaturama višim od 550° C maghemit γ -Fe₂O₃ gubi osobine feromagnetika.

Proces se tako odvija da α -Fe₂O₃ (hematit romboedarski) bude redukovan u Fe₃O₄ a dobijeni proizvod se hladi do temperature od 400° C u redukcionoj atmosferi. Zatim se pri toj istoj temperaturi novonastali proizvod oksidiše u struji vazduha u γ -Fe₂O₃ (maghemit) prema jednačini:



Do izmene u pogledu magnetičnosti minerala može doći i nakon delovanja kiselina na minerale. Tako se magnetska svojstva kolumbita mogu menjati posle obrade minerala slabim rastvorom kiseline (hlorovodonične, sumporne) što se objašnjava izmenom valentnosti gvožđa u površinskim slojevima minerala. Obrnuti efekat postiže se obradom mangantantalita i fergusonita kiselinama kada dolazi do vidne demagnetizacije minerala. Naime dolazi do izmene valentnosti mangana i elemenata iz grupe retkih zemalja, kao i do obrazovanja kompleksnih jedinjenja sa anjonima primenjenih kiselina, sa drugim magnetnim svojstvima i dr.

Tablica 8.5 Magnetski susceptibilitet različitih sirovina i minerala (po V.Hencl-u, 1972.)*

Minerali		χ (10^{-8} m ³ /kg)	$-\chi$ (10^{-8} m ³ /kg)
Ankerit/Erzburg, Poljska	Fe=21,5 %	25,8	1,2
Getit-Kepuš, Rumunija	Fe=51,80 %	62,3	1,22
Hematit-Malberget, Švedska	Fe=52,5 %	169,3	3,22
Kasiterit-Cinovec, Češka	Sn=72,0 %	4,07	0,056
Siderit-Rudnjani, Slovačka	Fe=42,2 %	75,3	1,87
Martit-Moncorvo, Portugal	Fe=42,2 %	793,66	18,67
Spekularit-Rudnjani, Slovačka	Fe=65,7 %	92,3	1,4
Spekularit-Caue, Brazil	Fe=65,7 %	225,2	3,43
Volframit-Cinovec, Češka	W=42,85 %	71,57	1,67

*Hencl, V., "Mokre magneticke rozdružovani slabe magnetických mineralu. Doktorska dizertačna praca, Praha, 1972.

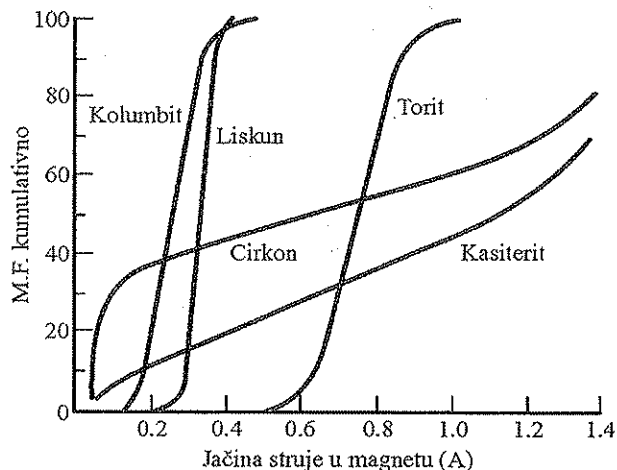
*Lukač, J., "Fyzikalne metody rozdružovania", Banická fakulta, Košice, 1993.

8.1.6 LABORATORIJSKI UREĐAJI ZA RAZDVAJANJE JAKO I SLABO MAGNETIČNIH MINERALA

Minerali se u pogledu svojih magnetskih osobina široko razlikuju. Postoji čitav niz različitih magnetskih osobina ali samo se jedna najčešće koristi u radu sa laboratorijskim analizatorima a to je permeabilitet. Obično kažemo da je mineral magnetičan kada je vidljivo privučen jakim magnetom. S druge strane na nemagnetični mineral neće se značajnije uticati magnetnim poljem (ova definicija se ne može striktno prihvatiti, ali u odsustvu strožijih i složenijih objašnjenja uzroka i prirode magnetizma, ono će zadovoljiti svrhu ove knjige). Kontrolišući jačinu magneta (ili preciznije, kontrolišući gustinu magnetskog fluksa) moguće je frakcionisati minerale prema njihovom magnetskom permeabilitetu. Sl.8.2.

8.1.7 POTKOVIČASTI MAGNET

Ručni magnet se najčešće koristi za odvajanje jako magnetičnih minerala. Uzorak se rasprostire na list hartije u monosloju. Preko polova magneta se postavi list hartije ili parče najlona i polovima prelazi preko monosloja zrna. Prihvaćena zrna se prebacuju na drugi list hartije, i skidaju jednostavnim odvajanjem magneta od hartije. Nakon izdvajanja magnetične frakcije iz uzorka, istu prečišćavamo nekoliko puta kako bi se eventualno uklonila mehanički zahvaćena nemagnetična zrna iz ove magnetične frakcije.



Sl.8.2 Magnetski permeabilitet minerala "teške frakcije" iz kasiteritske rude (po M.P.Jones, 1987.; Nigerijska ruda kalaja, izdvajanje je vršeno pri jačini struje od $\approx 0,4$ ampera, a izdvojen je kolumbit i liskuni od torita. Cirkon i kasiterit su se pojavljivali i u magnetičnoj i u nemagnetičnoj frakciji).

Pored potkovičastog ili magneta u obliku savijene čelične šipke, u laboratorijama ćemo često sretati i ručne magnetne kao onaj predstavljen na slici 8.3.

8.1.8 "EKLIPSA" RUČNI MAGNET

"Eklipsa" je permanentni magnet promenljive jačine, koji se može koristiti za izdvajanje određenih zrna minerala u kategoriji po njihovoj magnetičnosti. Jačina magnetnog polja između polova može da bude različita, spajanjem u niz ili razdvajanjem dva odvojena magneta

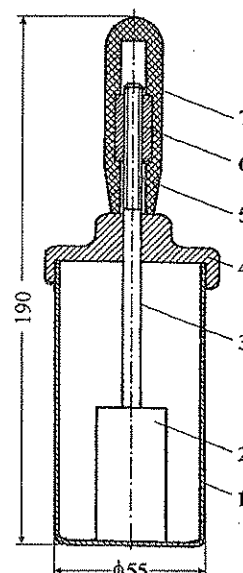
postavljena u samom telu instrumenta (Sl.8.4). Na taj način, magnetom se mogu dobiti najmanje četiri frakcije, na sledeći način:

- Kada je magnet "isključen", on ima malo rezidualno magnetno polje, ali još uvek privlači jako magnetične minerale, kao što je magnetit. (Kao i kod rada sa ručnim potkovičastim magnetom, preporučuje se magnetni pol prevući tankom plastičnom folijom, da bi se sprečilo "lepljenje" i prijanjanje čestica minerala na polove magneta).

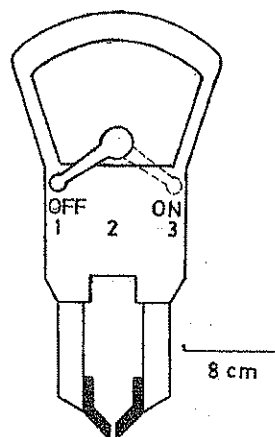
- Kada je magnet "polu uključen" on privlači umereno magnetične minerale, kao što je ilmenit.

- Kada je magnet "uključen" on privlači slabo magnetične minerale kao što su granati i gvoždem bogati liškuni.

- Minerali koji su u principu nemagnetični, kao što je kvarc, neće biti privučeni polovima čak i ako je magnet "potpuno" uključen.



Sl.8.3 Ručni magnet RM-1. Legenda: 1-telo ručnog magneta od legure aluminijuma; 2-cilindrično magnetno telo (magnetična legura SPM-16), pričvršćeni za šipku 3; poklopac cilindra i nosač šipke 4; plastična ručka koja se sastoji od dva dela 5 i 7 međusobno povezanih navrtkom 6.

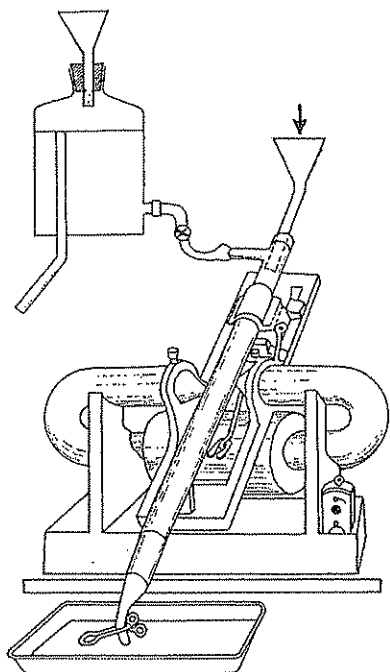


Sl.8.4 Ručni "eklipsa" magnet

8.1.9 DAVIS-OV MAGNETSKI ANALIZATOR

Ovaj uređaj se koristi za izdvajanje jako magnetičnih minerala iz usitnjenih i klasiranih uzoraka do određene krupnoće. Analizator se sastoji iz prstenastog elektromagneta sa zašiljenim polovima i specijalno konstruisane staklene cevi postavljene pod uglom od 45° između polova magneta, a sama cev ima mogućnost ritmičkog pomeranja duž svoje ose uz pomoć ugrađenog elektromotora i mehanizma (Sl.8.5).

Reprezentativni uzorak mase 5-10 grama potapa se u staklenu čašu sa vodom i homogenizira kako bi se nakvasio. Uključuju se elektromagneti, i sa gornje strane staklene cevi sipa predhodno pripremljena suspenzija i puni do nivoa od oko 10 santimetara od gornje ivice, odnosno pazi se da nivo vode sa mineralima bude uvek iznad polova magneta. Uz povremeno ispuštanje zrna nemagnetične frakcije, zajedno sa vodom cev se prazni na donjem delu. Istovremeno sa gornje strane se pušta odgovarajuća količina vode i dodaje uzorak. Kretanje cevi se reguliše ugrađenim mehanizmom. U samoj cevi, na njenim zidovima na nivou magnetskih polova skupljaju se grozdovi zrna magnetičnih minerala i usled ritmičkog pomeranja staklene cevi oni se stalno ispiraju uz odpuštanje eventualno zahvaćenih zrna nemagnetičnih minerala. Kada se na polovima prikupi veća količina zrna magnetičnih minerala prekida se sa dodavanjem novih količina sirovine, isključuju polovi magneta, i uz ispiranje većim količinama vode otvara donji ventil na cevi i ispušta u poseban sud izdvojena magnetična frakcija. Postupak se ponavlja dok se ne propusti ceo uzorak sirovine kroz analizator. Nemagnetična frakcija se ispušta sa vodom iz staklene cevi s vremena na vreme, zavisno od brzine nakupljanja u donjem delu.

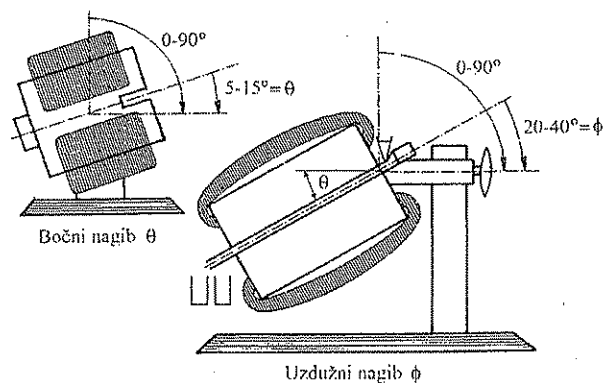
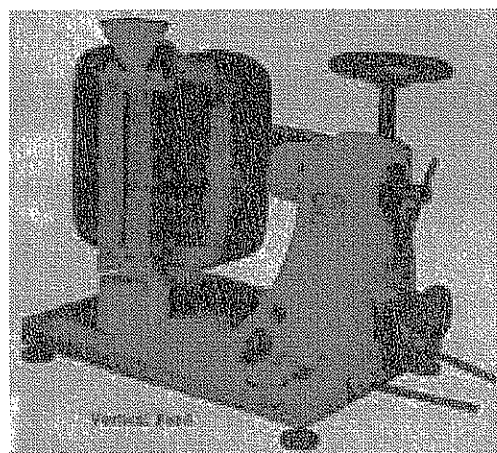
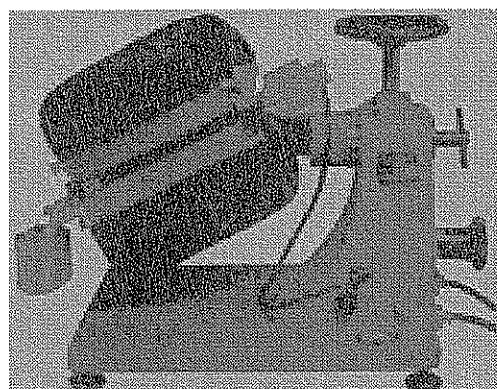


Sl.8.5 Davis-ov magnetski analizator

Magnetična frakcija se ispušta kad se predhodno prestalo sa dodavanjem novih količina sirovine odnosno kada su sva zrna nemagnetične frakcije uklonjena, i kada je voda u donjem delu cevi sasvim bistra.

Davis-ovim analizatorom uzorak se, mokrim postupkom, deli na dve frakcije: magnetičnu i nemagnetičnu. Nakon filtriranja, sušenja i merenja izračunava se njihov maseni udeo u polaznom uzorku. Da bi se imao potpuni uvid u uspešnost izdvajanja magnetičnih minerala iz uzorka, dobijene frakcije treba hemijski analizirati na sadržaj gvožđa i sumpora (ako je pored magnetita prisutan i pirotin) i eventualno ispitati binokularnim mikroskopom ili rudnim mikroskopom na specijalno pripremljenim preparatima.

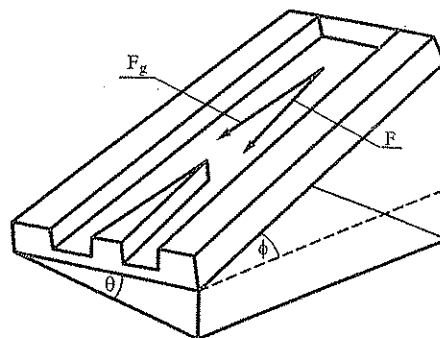
Ovaj magnetski analizator koristi se u okviru ispitivanja mineralnog sastava sirovina (kvalitativnog i kvantitativnog), za kontrolu procesa magnetske koncentracije i za izdvajanje magnetične frakcije iz rude posle magnetizirajućeg prženja.



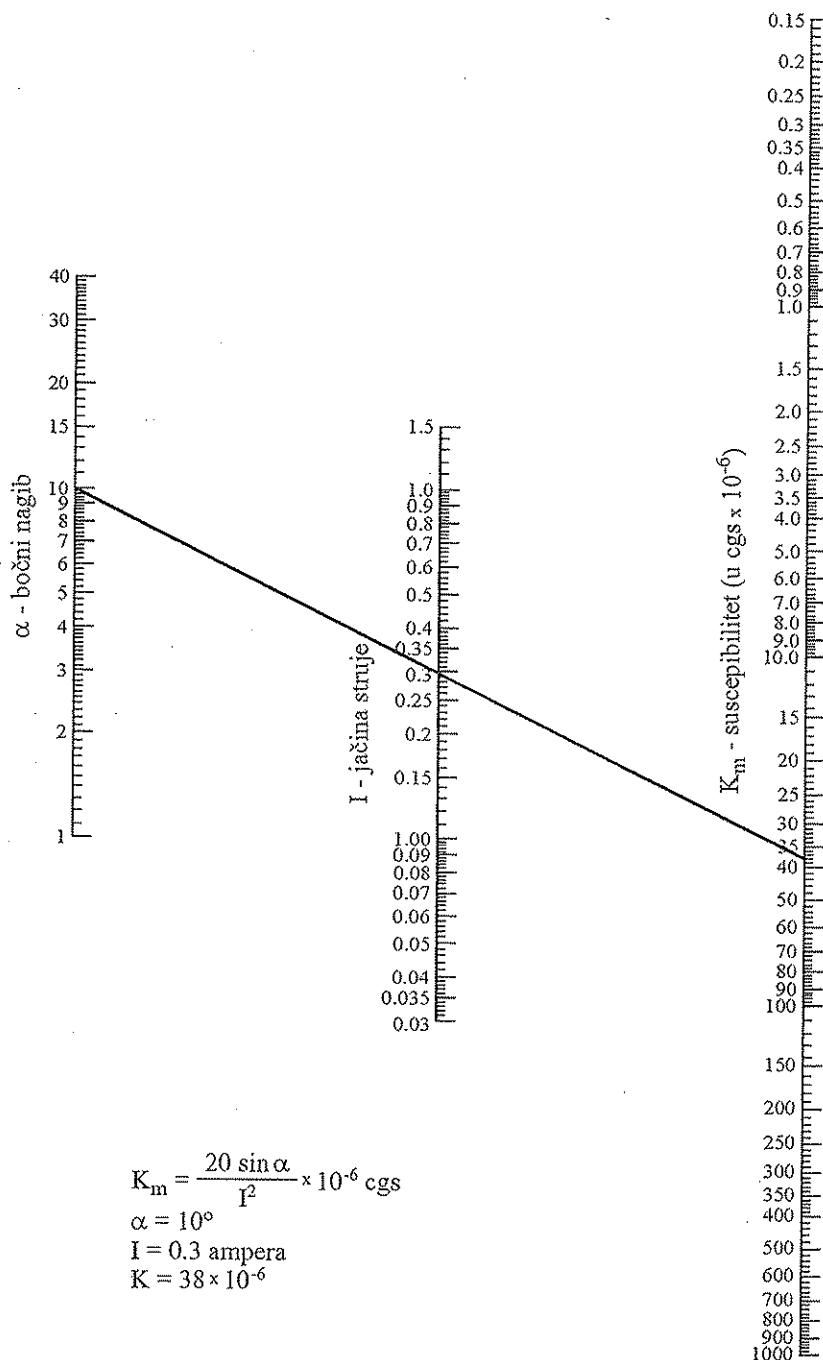
Sl.8.6 Frantz Izodinamički analizator model L-1, uzdužni i poprečni presek.

8.1.10 FRANTZ-OV IZODINAMIČKI MAGNETSKI ANALIZATOR

Karakterizaciju minerala po magnetičnosti moguće je izvesti i dokazati sa mnogo složenijim uređajima. Jedan od takvih uređaja je i izodinamički magnetski analizator - separator (Sl.8.6), laboratorijski instrument za koji nema ekvivalentnog uređaja u industrijskom pogonu. Izodinamički analizator se postepeno dozira preko levkaste hranilice sa vibratorom, u tankom mlazu duž žljeba (Sl. 8.7), mešavinom, mineralnih zrna, kroz kanal koji je smešten između polova jakog elektromagneta. Polovi magneta su tako oblikovani da je gradijent magnetnog polja usmeren prema izlazu, na krajevima magnetnih kalemova (gde se i nalaze posude za prihvatanje frakcija).



Sl.8.7 Ilustracija žljebastog kanala i način frakcionisanja sirovine pod dejstvom magnetnog polja i različitim - uzdužnim i poprečnim - nagibima.



Sl.8.8 Frantz Isodynamic Separator Model L-1, nomogram za očitavanje magnetnog susceptibiliteta

Jačina magnetnog polja se kontroliše regulisanjem jačine struje koja teče kroz namotaje elektromagneta. Količina uzorka je, obično, nekoliko desetina grama na sat i kontroliše se promenom amplitude vibracija žljeba hranilice. Uzorak mora biti savršeno suv, da ne bi došlo do slepljivanja zrna. Uzorak takođe mora biti, za optimalne uslove, usko klasiran i da bude u rasponu od 50 do 500 μm . Zbog magnetske remanencije elektromagneta, gradijent polja nikad nije nula, te je zbog toga važno ukloniti sve feromagnetične minerale, kao što je recimo magnetit, ručnim magnetom pre korišćenja izodinamičkog analizatora (separatora); u suprotnom, će se ova zrna prilepiti na delove polova magneta, brzo će zapuštiti sam žleb što će dovesti do zagušenja analizatora.

Izodinamički magnetski analizator može se koristiti ne samo za frakcionisanje mineralnih zrna već takođe i za određivanje, semikvantitativno, magnetskog susceptibiliteta različitih frakcija minerala. Magnetski susceptibiliteti minerala privučenih na magnet pri različitim jačinama polja (pri različitoj amperazi u namotajima) može da se izračuna iz formule:

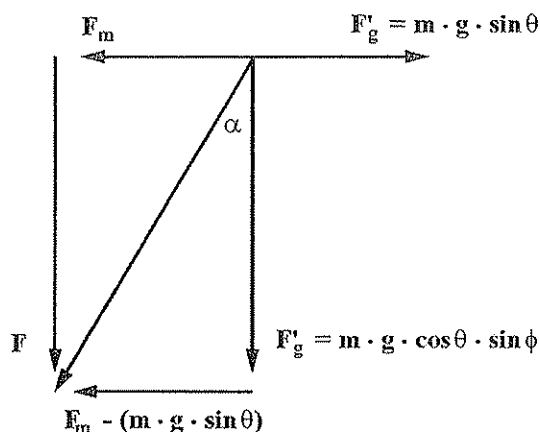
$$K_m = C \cdot \frac{\sin \alpha}{I^2}$$

gde je:

- K_m - maseni magnetski susceptibilitet;
- α - nagib poprečne ose, i
- I - jačina struje kroz namotaj magneta.

Magnetni susceptibilitet se menja sa kvadratom jačine struje, koja prolazi kroz magnet i takođe sa uglom poprečnog nagiba žljeba u kojem se vrši razdvajanje. Slika 8.8 prikazuje nomogram koji povezuje nagib, jačinu struje magneta i vrednosti masenog susceptibiliteta.

Delovanje sila na zrno minerala, u samom žljebu može se ilustrovati sledećim grafikom datim na slici 8.9:



Sl.8.9 Delovanje sila na zrno minerala, u žljebu analizatora

Na česticu, zrno u žljebu za razdvajanje deluje sila magneta

$$F_m = C k_2 V I^2 \text{ odnosno } F_m = C \cdot \chi_m \cdot V \cdot I^2$$

gde su:

- C - konstanta magneta,
- k_2 - zapreminska magnetska osetljivost (zapreminski magnetski susceptibilitet),
- V - zapremina zrna,
- I - jačina struje.

Sila teže

$$F_g = V \delta g \sin \alpha$$

gde su:

- δ - gustina čestice minerala,
- α - ugao nagiba ose.

U uslovima ravnoteže, kada se čestica minerala uravnoteži i prestane delovanje sila, odnosno $F_m = F_g$ imamo

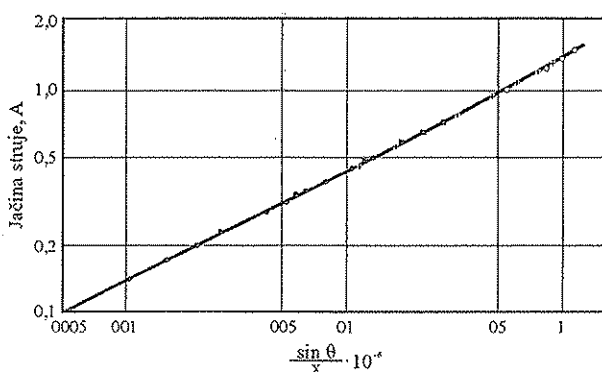
$$C k_2 V I^2 = V \delta g \sin \alpha$$

zamenimo li specifičnu magnetsku osetljivost $k_2/\delta = \chi$ i konstante $g/C = f$ dobijamo

$$\frac{k_2}{\delta} = \frac{g}{C} \cdot \frac{\sin \alpha}{I^2} \Rightarrow \chi = \frac{\sin \alpha}{I^2}$$

Na Sl.8.8 dat je nomogram koji omogućava direktno očitavanje magnetskog susceptibiliteta minerala koji je izdvojen iz uzorka pri određenim uslovima rada analizatora.

Kao što se vidi iz gornje jednačine, između C i $\sin \alpha / I^2$ postoji linearna zavisnost. Ako se uzme materija sa poznatom magnetskom osetljivošću (susceptibilitetom) χ , pri ravnotežnim uslovima između sila F_m i F_g , zatim odredi ugao nagiba ose α i jačinu struje I , i ako se za ordinatu odredi χ , a za abscisnu osu odredi se $\sin \alpha / I^2$, na grafiku se može odrediti vrednost f kao tangens ugla nagiba dobijene prave i izračuna konstanta magneta C .



Sl.8.10 Kalibraciona kriva Frantz-ovog izodinamičkog analizatora (● određeno sa $\text{FeSO}_4(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$; ■ određeno sa $\text{NiSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$; + bakarni sulfat).

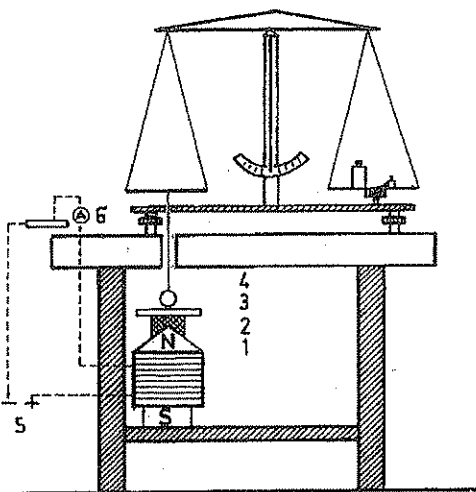
Poznavajući C , i koristeći se pomenutim jednačinama moguće je odrediti magnetski susceptibilitet (osetljivost) χ za neki mineral. U svojstvu etalona za konstrukciju grafika na Sl.8.10, radi određivanja f i C moguće je koristiti soli poznatog magnetskog susceptibiliteta (manganov pirofosfat $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$ sa $\chi = 8,3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$; manganov hlorid MnCl_2 sa $\chi = 11,45 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ ili druge), datih u narednoj tablici 8.6:

Tablica 8.6 Magnetski susceptibilitet nekih soli

Soli	Magnetski susceptibilitet
$\text{FeSO}_4(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	32,6
$\text{NiSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	16
$\text{CoSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	37
$\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	41,5
MnPO_4	69

Magnetski susceptibilitet (osetljivost) je moguće odrediti i uz pomoć elektromagnetske vage. Ova vaga se sastoji od sledećih glavnih delova: magnetski sistem (1) od namotaja i jezgra elektromagneta; postolja ili stalka od nemagnetičnog materijala (2); na ovo postolje se postavlja loptasti sud (3) od, takođe, nemagnetičnog materijala (obično od stakla) koji je elastičnom niti (4), svojim drugim krajem, vezan za tas analitičke vage.

U stakleni loptasti sud se stavlja određena odvaga supstance sa poznatom magnetskom propustljivošću. U svojstvu etalona obično se uzima određena odvaga, oko 0,2-2,0 g, pirofosfata mangana. Staklena posuda sa etalomom se sad uravnoteži, odgovarajućim tegom koji se postavlja na drugi tas vage. U momentu ravnoteže nit na kojoj visi sud sa etalomom, mora biti zategnuta. Međutim, staklena posuda mora doticati postolje u momentu ravnotežnog položaja, kada je kazaljka vage na nuli. Neznatno povećanje mase tegova na drugom tasu vage trebalo bi da odvoji "odlepi" staklenu posudu od postolja i pomeri iglu vage. Operacija uravnotežavanja staklene posude izvodi se pri isključenom magnetskom sistemu. Kada je stakleni sud sa etalomom uravnotežen, uključuje se strujni tok (preko klema 5 povezanih sa generatorom jednosmerne struje stalne jačine) koji se reguliše jednim reostatom. Pod dejstvom magnetskog polja stakleni sud biva privučen na postolje. Za njegovo odvajanje "odlepljivanje" i dovođenje u ravnotežu neophodno je na drugi tas vage dodati određenu masu tegova. Određeni dodatni teg, neophodan je za uravnotežavanje sile privlačenja magnetom. Takvo određivanje uravnotežavajućeg tega radi se pri različitoj jačini struje, na primer 1, 2, 3, 4, 6 A. Nakon toga etalon se vadi iz staklene posude, i umesto njega se puni mineralom koji se ispituje (čiji se susceptibilitet određuje) i meri se njegova masa (krupnoća materijala treba da bude ispod 0,2 mm).



Sl.8.11 Šematski prikaz rada elektromagnetske vage. Legenda: 1-Pol elektomagneta; 2-Nosač; 3-Uzorak u staklenoj loptastoj posudi; 4-Nit; 5-Prekidač toka struje; 6-Ampermetar.

Nadalje se operacije sa uzorkom minerala ponavljaju istim redosledom kao sa etalomom i određuje se masa tega neophodna za uravnoteživanje staklene posude sa uzorkom pri različitim jačinama struje (dve do tri vrednosti). Određivanje se izvodi 2-3 puta, na osnovu čega se izračunava srednja vrednost.

Magnetski susceptibilitet ispitivanog uzorka minerala izračunava se po obrascu:

$$\chi_{uz} = \frac{\chi_{et} \cdot \Delta m_{uz} \cdot M_{et}}{\Delta m_{et} \cdot M_{uz}}$$

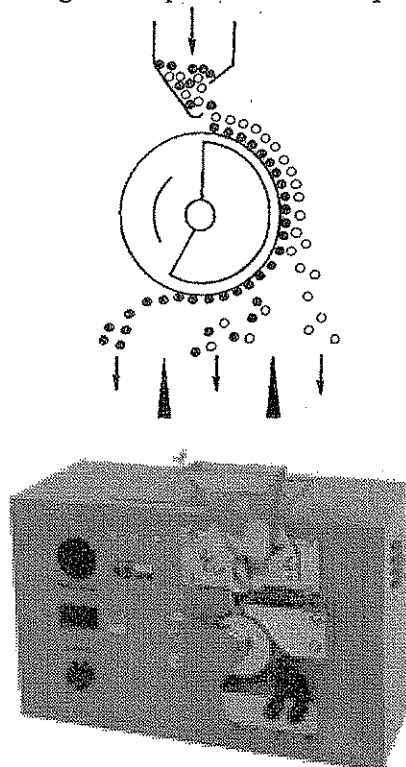
gde su:

- χ_{et} - specifični magnetski susceptibilitet (osetljivost) etalona;
- χ_{uz} - specifični magnetski susceptibilitet uzorka minerala;
- Δm_{et} - masa tegova, neophodna za uravnoteživanje dejstva magnetskih sila pri opterećenju etalomom;
- Δm_{uz} - masa tegova, neophodna za uravnoteživanje dejstva magnetskih sila pri opterećenju uzorkom;
- M_{et} - masa etalona;
- M_{uz} - masa uzorka minerala.

8.1.11 MAGNETSKI SEPARATOR (ANALIZATOR) SA BUBNJEM

Bubnjasti magnetski analizator (separator) je mnogo manje osetljiv uređaj za frakcionisanje sirovine nego što je Frantz-ov izodinamički analizator. On ima izvesne prednosti jer je na njemu moguće obraditi više kilograma materijala na sat, a čiji je raspon krupnoće od 50 - 500 μm . Analizator se sastoji od rotirajućeg cilindra (bubnja) smeštenog oko zaobljenog pola jakog elektromagneta. Sl.8.12.

Firma "Carpco" proizvodi laboratorijske uređaje od kojih su svakako najpoznatiji visoko intenzitetni bubnjasti magnetski separator tip MIH13 odnosno visoko intenzivni magnetski separator sa trakom tip MLH13.



Sl.8.12 Šematski prikaz rada magnetskog separatora sa bubnjem i sam uređaj.

8.2 MAGNETOHIDRODINAMIČKO I MAGNETOHIDROSTATIČKO RAZDVAJANJE MINERALA

8.2.1 MAGNETOHIDRODINAMIČKI METOD (MHD) RAZDVAJANJA MINERALA

Princip magnetohidrodinamičkog razdvajanja minerala (MHD) pominje se kod italijanskog inženjera *Michela* (1959.). Zasniva se na korišćenju polja elektrodinamičkih sila, čija je jačina promenljiva. Svaki elektroprovodnik postavljen u homogeno magnetno polje izložen je delovanju sile, koja se utvrđuje pravilom desne ruke – Lorencova sila (palac u smeru kretanja električne struje, kažiprst u smeru magnetnog polja S-J, srednji prst pokazuje smer delovanja elektrodinamičke sile).

Ova sila je matematički data izrazom:

$$F_L = V j B = V \mu \mu_0 E H \sigma$$

gde su:

V - zapremina provodnika u magnetskom polju;

j - gustina struje;

B - magnetska indukcija;

F_L - Lorencova sila;

H - intenzitet magnetskog polja;

E - magnetsko polje;

σ - električna provodnost

μ - magnetska permeabilnost.

F_L je Lorencova sila, koja deluje na elektroprovodnik, koji je u slučaju MHD izdvajanja minerala, vodeni rastvor teške tečnosti - elektrolita koji protiče kroz kivetu postavljenu između polova magneta. Kiveta je opremljena mrežastim elektrodama, i po njihovom priključenju na izvor napona, elektrolitom se uspostavlja tok struje (protiče struja), upravno na magnetske silnice. Lorencova sila deluje paralelno sa silom teže, na provodničke minerale, dok na neprovodnike ne deluje. Sa donje strane kivete se skupljaju minerali veće gustine, a sa gornje strane plivaju minerali manje gustine ili "lakši" minerali (Sl.8.13).

Hidrostatski potisak, koji deluje u teškoj tečnosti zajedno sa Lorencovom silom dat je izrazom:

$$p = \delta g Y$$

gde su:

δ - gustina tečnosti;

g - gravitaciona konstanta;

Y - dubina ravni na koju deluje potisak elektrolita.

Sumarna rezultujuća sila potiska koja deluje na mineralno zrno je data izrazom

$$p_v = \delta g Y + \mu \mu_0 E H \sigma Y$$

gde su:

σ - električna provodnost,

μ - permeabilnost vakuma,

E - intenzitet električnog napona.

H - intenzitet magnetskog polja,

p_v - ukupni potisak na zrno.

g - gravitaciona konstanta;

Y - dubina ravni na kojoj deluje potisak elektrolita;

δ - gustina tečnosti.

Telo zaronjeno u tečnost je pod uticajem sile potiska F_s prema izrazu:

$$F_s = V g \nu$$

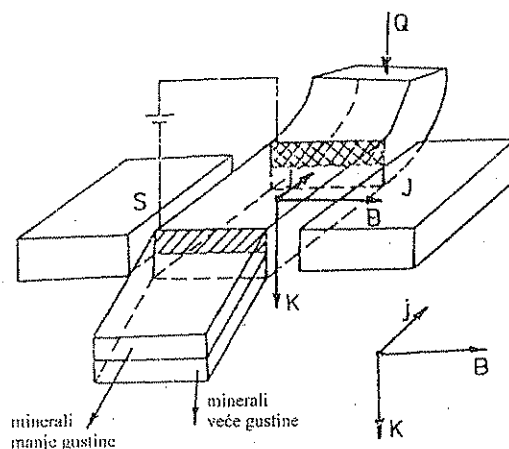
Rezultujuća sila F koja deluje na zrno gustine ρ je data u izrazu:

$$F = V \rho g - V \delta_s g = V g (\rho - \delta_s)$$

gde su:

δ_s - prividna gustina teške tečnosti;

ρ - gustina zrna.



Sl.8.13 Ilustracija razdvajanja minerala primenom magnetohidrodinamičkog metoda (delovanje sile, frakcionisanje sirovine)

Krupnoća zrna za ispitivanje mogućnosti izdvajanja minerala metodom MHD je 1-5 mm, mada donja granica može pasti i do 0,1 mm.

Nedostaci ove metode izdvajanja su potreba za velikom količinom energije i relativno visoka investiciona ulaganja. Regeneracija elektrolita je jednostavna, metod se koristi, osim u laboratorijskom radu, kod izdvajanja dijamanta, kod pripreme uglja i dr.

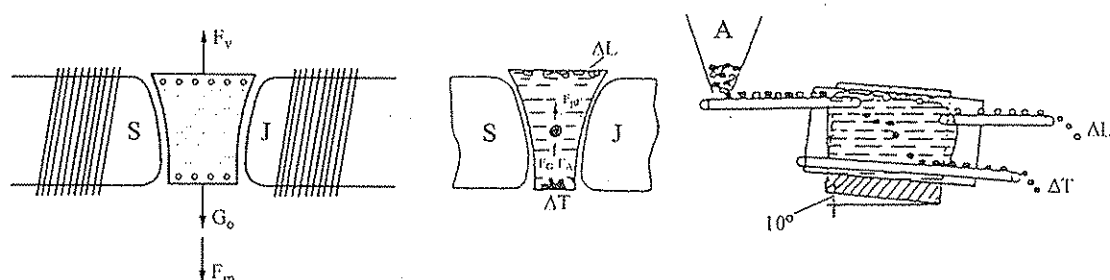


8.2.2 MAGNETOHIDROSTATIČKI METOD (MHS) RAZDVAJANJA MINERALA

Magnetohidrostatski metod (MHS) razdvajanja minerala, pominje se prvi put u Rusiji 1962. godine kao postupak razdvajanja različitih minerala u magnetičnim tečnostima.

Tečnost koja se koristi pri MHS postupku razdvajanja je paramagnetična i postavlja se između polova elektromagneta, koji su tako postavljeni da stvaraju nehomogeno magnetsko polje (Sl.8.14).

Između polova se postavlja sud (kiveta) kojom protiče paramagnetična tečnost, rastvor $MnCl_2$, $MnBr_2$, $FeCl_3$, a mogu se koristiti koloidne suspenzije načinjene od fino-zrnog Fe_3O_4 , čije čestice su manje od 10 μm .



Sl.8.14 Ilustracija razdvajanja minerala u paramagnetičnoj tečnosti primenom magnetohidrostatickog metoda

U stvari, polovi su tako napravljeni da magnetsko polje deluje smerom paralelnim gravitacionom polju u smeru na dole. Nemagnetično telo zaronjeno u paramagnetičnu tečnost, u magnetskom polju, će biti "olakšano" pored hidrostatickog potiska i magnetskim potiskom.

$$F_v = \mu_0 (\kappa_s - \kappa_l) H \text{ grad } H \text{ V}$$

gde su:

κ_s - magnetski susceptibilitet čestice čvrste faze,

κ_l - magnetski susceptibilitet paramagnetične čestice.

Dijamagnetične supstance (minerali) su istisnute iz tečnosti silom potiska F_v , koja deluje obrnutim smerom od smera magnetnog polja. Vrednost κ_s dijamagnetičnih minerala (supstanci) je bliska nuli ili ima negativne vrednosti. Korišćenje ove metode je danas na nivou laboratorijskog, a primenjuje se u pripremi sekundarnih sirovina.

prva-magnetična frakcija (siderit), druga magnetična frakcija (hematit, limonit) i treća nemagnetična frakcija (zlato, pirit). Ova druga magnetična frakcija koja sadrži hematit i limonit biće podvrgnuta izdvajanju monomineralnih frakcija ovih minerala uz pomoć Franc-ovog izodinamičkog separatora pri odgovarajućem podešavanju jačine struje i poprečnog nagiba žljeba u kome se vrši frakcionisanje. U tablici 8.7 prikazani su rezultati frakcionisanja ova dva minerala sa odgovarajućim sadržajima i raspodelom koji su postignuti pri sledećim uslovima: jačina struje $I=0,3$ A, poprečni nagib žljeba $\alpha_1=3^\circ$ i uzdužni nagib $\alpha_2=20^\circ$.

Izdvojena nemagnetična frakcija elektromagnetke separacije, koja sadrži zlato i pirit podvrgava se P-T analizi pri visokim gustinama ili magnetohidrostatickoj separaciji, uz izdvajanje pirita i zlata. Preostala laka frakcija, dobijena na klatnom stolu podvrgava se prvo flotiranju kalcita, a zatim se ponovo flotiranjem izdvaja feldspat odnosno koncentrat kvarca.

❖ ❖ ❖
* Primer: Kompleksna sirovina, iz koje treba izdvojiti monomineralne frakcije sadrži slobodna zrna: zlata, magnetita, siderita, hematita, limonita, pirita, kalcita, feldspata i kvarca. Iz sirovine koja je svedena na krupnoću ispod 0,2 mm, prvo se na klatnom stolu vrši frakcionisanje minerala po gustini na laku i tešku frakciju. Iz teške frakcije (zlato, pirit, hematit, limonit, siderit) se ručnim magnetom, uz nekoliko prečišćavanja mogu izdvojiti jako magnetični minerali (magnetit), dok će se nemagnetična frakcija (zlato, pirit, hematit, limonit, siderit) podvrgnuti elektromagnetnoj separaciji sa izdvajanjem tri frakcije:

❖ ❖ ❖
* Primer: Mineralna sirovina sadrži 15-25 % tetraedrita i tenantita, 15-20 % pirita, 25-30 % feldspata, 25-30 % kvarca. Sirovina je usitnjena do ispod 0,15 mm. Kako u sirovini imamo preko 50 % minerala dobrih provodnika to će se kao prvi stepen izdvajanja minerala primeniti elektrostaticka separacija. Izdvojena elektroprovodna frakcija dalje će se podvrgnuti elektromagnetnom razdvajanju, a u elektroneprovodnoj frakciji će se naći kvarc i feldspat. Rezultati elektromagnetnog izdvajanja pirita i tetraedrita sa tenantitom po pojedinim klasama krupnoće dati su u tablici 8.8.

Tablica 8.7 Bilans izdvajanja minerala izodinamičkim separatorom, klase krupnoće -0,074+0,043 mm.

Uslovi eksperimenta			Proizvodi	M. %	Hematit		Limonit	
Jačina struje	Poprečni nagib	Uzdužni nagib			Sadržaj	R. %	Sadržaj	R. %
0,15	3	20	Hematit	26	72	63,0	28	11,0
			Limonit	74	15	37,0	85	89,0
			Ulaz:	100,0	30,0	100,0	70,0	100,0
0,20	3	20	Hematit	16	80	41,0	20	10,4
			Limonit	84	2	59,0	98	89,6
			Ulaz:	100,0	30,0	100,0	70,0	100,0
0,30	1	20	Hematit	56	20	37,3	80	64,0
			Limonit	44	43	62,7	57	36,0
			Ulaz:	100,0	30,0	100,0	70,0	100,0
0,30	3	20	Hematit	42	98	81,6	2	2,3
			Limonit	58	8	18,4	92	97,7
			Ulaz:	100,0	30,0	100,0	70,0	100,0
0,030	6	20	Hematit	40	36	48,2	64	31,8
			Limonit	60	43	51,8	57	68,2
			Ulaz:	100,0	30,0	100,0	70,0	100,0

Tablica 8.8 Bilans elektromagnetne separacije minerala pirita i minerala nosilaca bakra (tetraedrit+tenantit)

Klase krupnoće	Ogled	Proizvodi	M, %	Pirit		Tetraedrit		Jačina struje, A
				Sadržaj	R, %	Sadržaj	R, %	
-0,25+0,15	1	M.F.	40,0	1,5	1,0	98,5	98,5	0,2
		N.M.F.	60,0	99,5	99,0	1,0	1,5	
		Klasa:	100,0	60,0	100,0	40,0	100,0	
	2	M.F.	42,0	6,0	4,0	94,0	98,5	0,3
		N.M.F.	58,0	99,0	96,0	1,0	1,5	
		Klasa:	100,0	60,0	100,0	40,0	100,0	
	3	M.F.	50,0	21,0	17,5	79,0	98,8	0,5
		N:M:F:	50,0	99,0	82,5	1,0	1,2	
		Klasa:	100,0	60,0	100,0	40,0	100,0	
-0,15+0,074	4	M:F:	40,0	3,0	2,0	97,0	97,0	0,2
		N:M:F:	60,0	98,0	98,0	2,0	3,0	
		Klasa:	100,0	60,0	100,0	40,0	100,0	
	5	M:F:	43,0	8,3	6,0	91,7	98,6	0,3
		N:M:F:	57,0	99,0	94,0	1,0	1,4	
		Klasa:	100,0	60,0	100,0	40,0	100,0	
	6	M:F:	44,0	10,0	7,7	94,0	98,6	0,5
		N:M:F:	56,0	99,0	92,3	1,0	1,4	
		Klasa:	100,0	60,0	100,0	40,0	100,0	

Izdvajanje pirita i tetraedrita sa tenantitom postiže se elektromagnetskim izdvajanjem pri jačini struje 0,2 A. Izdvajanje ovih minerala može takođe da se izvede i izodinamičkim analizatorom pri sledećim uslovima: ja-

čina struje $I=0,8$ A, poprečni nagib žljeba $\alpha_1=2^\circ$, uzdužni nagib žljeba $\alpha_2=20^\circ$.

❖ ❖ ❖

8.3 MOGUĆNOSTI SELEKTIVNOG IZDVAJANJA MINERALA NA OSNOVU ELEKTRIČNIH OSOBINA

8.3.1 PRIPREMA SIROVINE ZA ELEKTRIČNO RAZDVAJANJE MINERALA

Svaki mineral se odlikuje specifičnim osobenostima, po kojima se uvek može, na izvestan način, razlikovati od drugih. To su gustina, tvrdina, sjaj i dr. Na razlici u fizičkim, fizičko-hemijskim i hemijskim svojstvima zasni- vaju se svi poznati metodi PMS. Električna svojstva materije zavise od vlažnosti i temperature sredine. Električna svojstva se ispoljavaju na različite načine, a u za- visnosti od formi i dimenzija zrna minerala. Sve ovo određuje važnost odgovarajućih pripremnih operacija pre elektroseparatora. Postoji mišljenje, da električna separacija zahteva pre koncentracije vrlo savesnu predhodnu pripremu materijala i precizno se moramo pridržavati svih tehnoloških (ili laboratorijskih) uslova za razliku od drugih metoda koncentracije. Ovakvo mišljenje uslovilo je i možda nedovoljnu izučenost elektrokonzentracije (nije uvek jasno koji se faktori utiču na proces). Pripreme operacije pre elektrokonzentracije uslovljene su kako svojstvima po- lazne sirovine tako i uslovima razdvajanja. Ove pripre- mne operacije se odnose na klasiranje sirovine odnosno, polaznog materijala (peskovi iz rasipnih ležišta) na uske klase krupnoće, odmuljivanje ili odprašivanje čišćenje površine, sušenje.

Tehnološki rezultati koncentracije koji, se postižu na elektrokonzentratorima kod većine tipova uređaja zavisi od odnosa veličine naelektrisanja po znu (q/m). Veli-

čina naelektrisanja zrna, pri svim drugim istim uslovi- ma, određena je veličinom površine zrna. Ovo važi ka- ko u polju korone tako i pri indukcionom naelek- trisanju. U prostijim slučajevima veličina naelektrisanja proporcionalna je kvadratu radijusa loptastog zrna (masa loptastog zrna proporcionalna je kubu njenog ra- dijusa). Prema tome, s jedne strane elektokonzentratori se mogu koristiti i za klasiranje zrna po krupnoći, a sa druge strane, značajan raspon dimenzija zrna otežava razdvajanje. Pored toga, kao što je praksa pokazala, dobri rezultati elektrokonzentracijom se mogu postići, i bez uskog klasiranja materijala po krupnoći. Pomenuta okolnost uslovljena je time što pri tribo naelektrisanju zrna koja se razdvajaju često dobijaju različita naelektri- sanja, a pri naelektrisanju u polju korone i izdvajanju na bubnjastim koncentratorima zrna provodnici većih di- menzija gube svoje naelektrisanje, a neprovodna ostaju naelektrisana i silama "lika u ogledalu" se zadržavaju na bubnju.

Gornja granica krupnoće polaznog materijala - siro- vine određuje se veličinom električnih sila, koje su spo- sobne da premeste zrno određene mase i razmerama zrna korisnog minerala odnosno minerala jalovine u rudi. Elektroizdvajanju mogu biti podvrgnuti minerali sa kru- pnoćom zrna do 3 - 3,5 mm, i oslobođena eventualnog tankog omotača usled oksidacije prašine, i poželjno klasiranog u nekoliko klasa, na primer: -3+2; -2+1; -1+0,25 mm. Za neke minerale kao što su liskuni gornja krupnoća može biti i 5 - 6 mm.

Postojanje krupnih zrna dovodi obično do tehničkih poteškoća i narušavanja samog rada separatora. Donja granica krupnoće zrna uslovljena je silama adhezije koje dovode do aglomeracije čestica lepe se na delove uređaja, a kreću se kod većine tipova separatora od 30 - 70 μm . Efikasnost rada separatora opada sa smanjenjem krupnoće materijala što je uslovljeno neophodnošću hranjenja elektroseparatora u mono sloju.

8.3.2 ZAGREVANJE I UTICAJ VLAŽNOSTI NA PROCES RAZDVAJANJA

Temperatura i vlažnost se javljaju kao važan faktor regulacije procesa elektrorazdvajanja. S tim u vezi, a pošto su ova dva parametra vezana jedan sa drugim, moguće je već samom regulacijom temperature tehnički ostvariti povoljne uslove razdvajanja. Ovo se postiže zagrevanjem materijala, a kasnije njegovim obaveznim hlađenjem. Bitan uticaj na elektrorazdvajanje, takođe, ima i temperatura sredine, kao i odlagajuće elektrode.

Zagrevanje zrna dovodi do promena niza njihovih fizičkih i fizičko-hemijskih parametara. Sa povećanjem temperature povećava se i energija elektrona u samom zrnju kao i pokretljivost slobodnih jona. Ovo dovodi, često do smanjenja električne provodljivosti metala i do povećanja električne provodljivosti poluprovodnika i dielektrika. Od temperature suštinski zavisi i veličina tribo naelektrisanja. Niz minerala se odlikuje nereverzibilnošću promena posle njihovog dovoljno dugog zagrevanja, u rasponu temperatura od 100 - 800° C. Ova činjenica se potvrdila pri merenju električne provodljivosti kasiterita, barita, kvarca i feldspata u zavisnosti od temperature njihovog zagrevanja. Električne provodljivosti merene pri zagrevanju i hlađenju se ne podudaraju, što je vezano sa fizičko-hemijskim promenama, koje se dešavaju u ovim mineralima. Zagrevanje zrna menja veličinu sile adhezije. To, često, dovodi do toga da pri povećanju temperature povećava se i raspon krupnoće zrna koja prijanjaju (koja se lepe) na elektrodu. Na primer, kod izučavanja triboadhezionog razdvajanja je utvrđeno da za materijale - sirovine krupnoće -5+0 mm i njihovom zagrevanju do 300° C proizvod zrna kojih se zadržava na odlagajućoj elektrodi se povećava 1,5 - 2 puta, a za zrna krupnoće -1+0 mm se povećao 3 puta, već na temperaturi 150 - 200° C. U mineralima se razlikuje površinska, kapilarna i hemijski vezana voda. Zbog toga što na proces elektrorazdvajanja u znatnoj meri utiče vlaga na samoj površini, često je dovoljno ukloniti samo taj mono sloj adsorbovane vlage.

8.3.3 PRIPREMA POVRŠINA ZRNA - OBRADA REAGENSIMA

Čišćenje površina zrna minerala od, na nju prilepljenih čestica prašine, ili od oksidnih skrama vrši se odstranjivanjem: mehaničkim otiranjem, mokrim gravitacionim postupcima, a često elektrorazdvajanju prethodi i obrada površinski aktivnim reagensima.

Mehaničko otiranje. Mehaničko otiranje, na primer, obično prethodi elektrorazdvajanju sirovine aluvijalnih, deluvijalnih i drugih tipova rasipnih ležišta, pri čemu je takav postupak pripreme neophodno sprovesti čak i za sirovine koje nemaju vidljive skrame (opne) na površinama minerala. Skrame ili opne se odstranjuju mo-

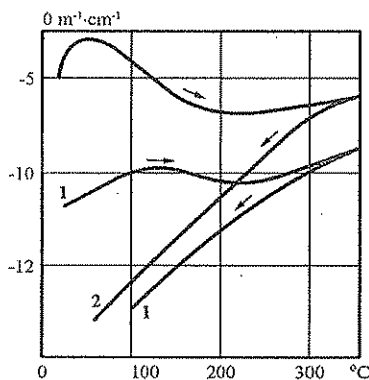
krom mehaničkom dezintegracijom, odnosno atricijom zrna. Neki minerali, se opet, ne mogu selektivno odvajati bez određene prethodne reagensne obrade površinski aktivnim supstancama.

Obrada reagensima. Obrada reagensima se može primeniti za selektivnu promenu elektrotopnosti površine zrna, često putem stvaranja veće razlike u hidrofbnosti i hidrofilnosti površina minerala, koji se odvajaju, a takođe i u svrhu selektivne promene elektrizacije zrna kod tribo naelektrisanja.

Prema tome rezultati obrade površina minerala mogu biti: a. čišćenje površina minerala odnosno odstranjivanje nečistoća ili oksidacionih skrama sa površina; b. selektivno oblaganje površina minerala nekim slojem.

U prvom slučaju kondicioniranje se ostvaruje prvenstveno u vodenoj suspenziji, dok se u drugom slučaju, obrada površina izvodi u suvom stanju odnosno primenom isparljivih reagenasa. Za čišćenje, otiranje površina mineralnih zrna u vodenoj suspenziji koriste se sledeći reagensi: sumporna, hlorovodonična i fluorovodonična kiselina, hidrosulfit cinka ($\text{ZnSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Često susrećemo kao skramu na površini minerala okside gvožđa, koje uklanjamo slabim rastvorima sumporne kiseline.

Za selektivno oblaganje minerala uspešno se može primeniti benzojeva kiselina. Karakteristika ovog isparljivog jedinjenja je da se zagrevanjem ili u kontaktu sa mineralima neposredno posle sušenja, ona pretvara u pare koje oblažu zrna minerala tankim slojem, skramom. Pored toga, benzojeva kiselina se može koristiti i u vidu rastvora. Analogni rezultati mogu biti dobijeni primenom i drugih jedinjenja, kao što su na primer: salicilna, ftalna kiselina, krezol, ksilol. Nakon pripreme odnosno obrade površina minerala, vodenim rastvorima, minerali se peru čistom vodom i po potrebi suše.



Sl.8.15 Ilustracija uticaja zagrevanja i postepenog hlađenja mineralne sirovine na njenu elektroprovodnost. Mineral kvarca, kriva 1: krupnoća zrna -0,315+ 0,2 i kriva 2: krupnoća zrna -0,04+0 mm.

Obrada površina minerala površinski aktivnim reagensima, postiže se sledeći efekat: kod jednih minerala se menja znak tribonaelektrisanja dok se u isto vreme kod drugih zadržava polaritet naelektrisanja.

❖ ❖ ❖

✱ **Analiza primera:** Zrna silvina i halita pri trenju o aluminijumsku podlogu (tribonaelektrisanje) se naelektrišu negativno pri čemu je veličina negativnog naelektrisanja u zrnju silvina veća. Obrada iste sirovine amonijakom dovodi do toga da silvin pri tribonaelektrisanju dobija pozitivno naelektrisanje, a halit u tom slučaju ne menja znak naelektrisanja.

Moguće je nekoliko mehanizama dejstva reagenasa. Na primer, silvin i halit, tretirani aromatičnim kiselinama (salicilnom, benzosulfonskom) neznatno menjaju električnu provodljivost čak i u atmosferi sa visokom vlažnošću. Prema tome se može zaključiti da nema selektivne sorpcije ovih reagenasa na razmatranim mineralima, kao što je to slučaj pri delovanju amina.

Prianjanje ovih reagenasa na silvin i halit moguće je putem hemijske adsorpcije (hemisorpcije), a kao rezultat toga stvara se na površini sloj novog hemijskog jedinjenja. Reakcije izmene mogu se ostvariti ne samo sa jonima natrijuma i kalijuma, obrazovanjem odgovarajućih soli, već i sa jonima drugih elemenata, koji u vidu primesa ulaze u sastav silvina i halita.

Takođe je moguća athezija (prilepljivanje) reagenasa na površini minerala obrazovanjem površinskog sloja organskih kiselina. Kao rezultat dejstva ovih reagenasa na komponente silvinitne rude, javlja se hidrofobizacija površine silvina i halita, značajno povećanje njihove površinske otpornosti (za nekoliko redova) i selektivno tribonaelektrisanje pri uzajamnom trenju zrna.

U literaturnim podacima često se preporučuju za obradu kolektivnih koncentrata dobijenih gravitacijskim postupkom, a koji sadrže pirohlor, cirkon, apatit, upotreba katjonskih reagenasa, tipa IM-11 i alifatičnih amina, koji se takođe koriste i pri flotaciji ovih minerala. Koncentrat se tretira rastvorom reagensa, posle čega se suši, hladi i razdvaja u elektrostatičkom polju pri relativnoj vlažnosti vazduha 60-80 %. Na ovaj način se uspešno izdvaja pirohlor.

Dalje selektivno izdvajanje minerala iz koncentrata je moguće nakon tretiranja sirovine rastvorom fluorovodonične kiseline. Ovom obradom električna provodljivost apatita se povećava sa $2,5 \times 10^{-14}$ do $3,5 \times 10^{-10} \text{ Ohm}^{-1} \text{ m}^{-1}$, kada se on dobro odvaja od cirkona elektroseparatorijom u polju koronarnog naelektrisanja. Pri razdvajanju smese minerala, koja se sastoji od pirohlor, cirkona i apatita, u polju koronarnog naelektrisanja utvrđeno je da se obrada površina ovih minerala površinski aktivnim reagensima odigrava - stvaranjem omotača, opne na njihovim površinama, koji se odlikuje različitom sposobnošću adsorpcije vode iz okolne atmosfere, od čije, u stvari, količine i zavisi veličina električne provodnosti površine minerala. Koncentrati, dobijeni posle izdvajanja, sadržali su 95 % cir-

kona pri 91,5 % iskorišćenja i 90 % apatita pri iskorišćenju 95 %.

U narednoj tablici 8.9 su navedeni neki primeri elektrostatičkog razdvajanja minerala.

Takođe, je moguća athezija (prilepljivanje) reagenasa na površini minerala obrazovanjem površinskog sloja organskih kiselina. Kao rezultat dejstva ovih reagenasa na komponente silvinitne rude, javlja se hidrofobizacija površine silvina i halita, značajno povećanje njihove površinske otpornosti (za nekoliko redova) i selektivno tribonaelektrisanje pri uzajamnom trenju zrna.

U literaturnim podacima često se preporučuju za obradu kolektivnih koncentrata dobijenih gravitacijskim postupkom, a koji sadrže pirohlor, cirkon, apatit, upotreba katjonskih reagenasa, tipa IM-11 i alifatičnih amina, koji se takođe koriste i pri flotaciji ovih minerala. Koncentrat se tretira rastvorom reagensa, posle čega se suši, hladi i razdvaja u elektrostatičkom polju pri relativnoj vlažnosti vazduha 60-80 %. Na ovaj način se uspešno izdvaja pirohlor.

Dalje selektivno izdvajanje minerala iz koncentrata je moguće nakon tretiranja sirovine rastvorom fluorovodonične kiseline. Ovom obradom električna provodljivost apatita se povećava sa $2,5 \times 10^{-14}$ do $3,5 \times 10^{-10} \text{ Ohm}^{-1} \text{ m}^{-1}$, kada se on dobro odvaja od cirkona elektroseparatorijom u polju koronarnog naelektrisanja. Pri razdvajanju smese minerala, koja se sastoji od pirohlor, cirkona i apatita, u polju koronarnog naelektrisanja utvrđeno je da se obrada površina ovih minerala površinski aktivnim reagensima odigrava - stvaranjem omotača, opne na njihovim površinama, koji se odlikuje različitom sposobnošću adsorpcije vode iz okolne atmosfere, od čije, u stvari, količine i zavisi veličina električne provodnosti površine minerala. Koncentrati, dobijeni posle razdvajanja, sadržali su 95 % cirkona pri 91,5 % iskorišćenja i 90 % apatita pri iskorišćenju 95 %.

U tablici 8.9 su navedeni neki primeri elektrostatičkog razdvajanja minerala.

Tablica 8.9 Primeri razdvajanja minerala elektrostatičkim postupkom (po J.E. Lawver-u)*

Arsenopirit-Feldspatska jalovina	Ilmenit-granati
Azbest-Silikati	Spekularit-silikati
Hromit/Ilmenit/Magnetit-monacit	Kaolin-Oksidi gvožđa
Ugalj-Pirit	Kijanit-Rutil, Oksidi gvožđa
Ugalj-Krečnjak	Magnetit-Silikati/Rutil
Minerali bakra-Silikati	Molibdenit-Silikati
Dijamant-Silikati	Monacit-Rečni pesak
Feldspati-Kvarc	Šelit-Pirit
Feldspati-Liskuni	Spodumen-Kasiterit
Fluorit-Silikati	Volframit-Pirit
Zlato/Platinodi-pesak	Liskuni-Feldspati/Silikati

*Lukač, J., 1993: "Fyzikalne metody rozdružovania", Banicka fakulta, Košice.

8.4 LITERATURA

1. Berlinskii, A. I., 1975: Razdelenie mineralov, Nedra, Moskva.
2. Jones, Meurig P., 1987: Applied Mineralogy a quantitative approach. - Graham and Trotman Ltd., London.
3. Lukač, J., 1993: Fyzikalne metody rozdružovania. - Banicka fakulta, Košice.
4. McAndrew, J., 1957: Calibration of a Frantz Isodynamic Separator and its Application to Mineral Separation, - Proceedings The Aus. I.M.M., No. 181.
5. Meseniashin, A. I., 1978: Elektricheskaia separatsiia v sil nykh poliakh. - Nedra, Moskva.
6. Milosavljević, R., 1974: Metode ispitivanja mineralnih sirovina u PMS, - Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
7. Derkach, V.G., Kopychev, P.A., 1956: Spetsial'nye metody obogashcheniia poleznykh iskopaemykh. - Metallurgizdat, Moskva.
8. Flintner, B. H., 1959: The magnetic separation of some alluvial minerals in malaya. - The American mineralogist, Vol. 44. (Jedan od vrlo retkih radova koji se odnose na problematiku načina korišćenja Frantz-ovog izodinamičkog analizatora.)

INDEX POJMOVA

A

Aerodinamičko prosejavanje · 149
 ahromatska sočiva · 106
 Alimarinova jednačina · 35
 američka sita Tyler · 153
 Amstutz · 209
 Analitički uzorak · 6
 analiza uglja · 58
 analizator slike · 205
 analizator slike · 81
 analize modalnog sastava · 77
 Andreasen-ova centrifugalna pipeta · 183
 Andreasen-ova pipeta · 181
 aplikativna procesna mineralogija · 213
 apsolutno suv ugalj · 51
 athezione sile · 205
 automatski analizator slike · 82
 azot · 61

B

Beaker decantation metod · 179
 Beckman-ov vazdušni piknometar · 260
 Beckman-ovim vazdušnim piknometrom · 259
 bilans čišćenja uglja · 280
 binarna modifikacija slika · 83
 birefleksija · 112
 Blajov elutriator · 193
 bližnjenje minerala · 97, 121
 bližnjenja prekrystalizacije · 121
 bližnjenja rasta · 121
 boja · 93
 boja minerala · 111
 boje luminescencije · 101
 broja pojedinačnih uzoraka · 24
 brojača tačaka · 125
 brušenje minerala - grubo i fino · 133
 Bruntonova jednačina · 34
 brzina raslojavanja · 269

C

Cena opreme · 170
 centrifugalni fotosedimentometar · 184
 centriranje mikroskopa · 105
 cepljivost · 96
 cink hlorid · 266
 Craig · 210

Č

Černenko · 34
 četkice za prosejavanje · 150
 čišćenje uglja · 279
 čist ugalj · 279

D

Džonsov razdeljivač · 40
 Davis-ov magnetski analizator · 297
 De Lesse-ov metod · 107
 definicija krupnoće zrna · 141
 delimičan hemijski sastav · 57
 deljivost · 97
 dielektrična propustljivost · 100
 diferencijalna metoda · 171
 dijagram etalonskih tipova srastanja · 209
 dijamagnetici · 292
 direktna kriva · 154
 direktne metode · 171
 disperzno sredstvo · 175
 donja toplotna moć DTM · 63

E

Efekat prosejavanja · 147
 efekat prosejavanja · 153
 efekti fluorescencije · 94

eklipsa ručni magnet · 296
 eksperimentalno uzorkovanje · 8
 električno razdvajanje minerala · 304
 elektro osobine minerala · 100
 elektroimpulsni analizator · 199
 elektromagnetska vaga · 301
 elektronski mikroskop · 204
 elementarna živa · 267
 elementarna analiza · 58
 Eltinor · 127
 elutrijaćijska analiza · 191
 elutrijaćator Bahco · 194
 energetska vrednost · 63
 engleska sita I.M.M. · 153
 epigenetski mineralni uklopici · 62
 etalonske boje · 94
 eutektoidna zamenjivanja · 91

F

fazna hemijska analiza · 58
 finoća mlevenja rude · 162
 fizičko-hemijski kriterijumi · 255
 fiziko-hemijski kriterijumi · 254
 fiziološka svojstva · 99
 Fleet-ov metod · 129
 fluorescencija · 93
 fokusiranje · 105
 forme zrna · 122
 formiranje slika · 83
 fosfor · 61
 fosforescencija · 93
 fotosedimentacijske metode · 189
 francuska sita AFNOR · 153
 Frantz isodynamic separator · 299
 Fraunhofer-ovi difrakcioni prstenovi · 203

G

Galehouse · 130
 Galehouse-ov linijski metod · 130
 Gaudin-Andreev-Schuhman-ova jednačina · 158
 generalni uzorak · 5
 geometrijska klasifikacija struktura · 211
 Glagolev-Chayes metod · 125
 gornja toplotna moć GTM · 63
 gradijenti priraštaja oslobađanja · 247
 granulometrijski i hemijski sastav · 162
 granulometrijsko uzorkovanje · 10
 greške skraćivanja · 46
 greške uzorkovanja · 46
 gruba vlaga · 51
 gruba, utovarna vlaga · 50
 grube greške · 46
 grupni uzorci · 6
 gustina minerala · 257
 gustina minerala · 98

H

Hemijski sastav sirovine · 57
 hemijsko uzorkovanje · 8

hidraulički klasifikator · 191
 hidrostatika vaga · 260
 hidrostatska vaga · 261
 higroskopna i kapilarna vlaga · 50
 higroskopna voda · 49
 higroskopna voda · 51
 holandska sita HCNN · 153
 holtenov elutrijaćator · 193
 Holtenov sto · 272
 homogenizacija prosejavanjem · 38
 homogenizacija uzorka · 37

I

Identifikacija mineralnih zrna · 88
 iluminacioni sistem · 110
 image processing and analysing system · 79
 imerzioni objektiv · 108
 impregnacija · 135
 indeks bliskosti · 211
 indeks blokiranosti · 211
 indeks sraslosti · 211
 indeks povezanosti · 211
 indenter · 117
 indirektno metode · 171
 individualni, pojedinačni uzorci · 6
 integracioni stočić Andin-a · 124
 integracioni stočić Shand-a · 123
 integralni stepen oslobođenosti · 230
 integralne metode · 171
 ISO · 230
 isparljive materije · 65
 istraživačka modalna ispitivanja · 78
 izbor postupka oslobađanja · 228
 izdvajanja uzoraka iz vagona · 18
 izodinamički magnetski analizator · 298
 izračunavanje ekvivalentnih prečnika · 203
 izvođenja sitovne analize · 148

J

Jalovina · 279
 jednačina Gaudin-Andreev-Schuhmann-a · 157
 jednačina Rosin-Rammler-a · 158

K

Kalb-ova metoda · 120
 Kalb-ova svetlosna crta · 119
 Kalb-ova metoda · 119
 kalibraciona kriva · 300
 kalorična vrednost · 63
 kalorimetar · 64
 kalorimetrijska bomba · 64
 karakteristike fino samlevenih materijala · 166
 karakteristike odseva · 163
 karakteristike orudnjenja · 29
 karakterizacija mineralne sirovine · 79
 kiseonik · 61
 klasifikacija struktura i tekstura · 90
 klasifikator ADAP · 192
 klivaž · 96

koeficijent jednakog padanja · 203
 kohezijone osobine minerala · 95
 kohezijone sile · 238
 kolektivni uzorci · 6
 koloidna voda · 49
 kombinovani postupak prosejavanja · 147
 kompatibilnost modela oslobađanja · 231
 kompatibilnost postupaka · 230
 kompletan hemijski sastav · 57
 konačna brzina padanja · 172
 konačni uzorak · 5
 konstitucionalna voda · 49
 konstitucionalna voda · 51
 kontrola hemijskih analiza · 47
 kontrolni (paralelni) uzorci · 47
 kontrolno prosejavanje · 146
 kontrolno uzorkovanje · 8
 konvencionalni ekspertni sistem · 83
 koordinacioni broj · 212
 korigovane vrednosti · 238
 kretanje prosejne površine · 151
 kristalna (kristalizaciona) voda · 49
 kristalne forme · 98
 kriterijum ekonomičnosti · 254
 kriterijum koncentracije · 272
 kriterijum mineralnog sastava · 254
 kriterijum sadržaja · 254
 kriterijum tekstura i struktura · 254
 kriterijumi izbora · 253
 kritična zrna · 150
 kriva graničnih slojeva · 281
 kriva graničnih slojeva · 282
 kriva M · 285
 kriva srednjeg sadržaja pepela · 282
 krive čišćenja uglja · 281
 krive čišćenja uglja po Majeru · 285
 krtost · 97
 krupnoća zrna · 142
 kumulativne krive · 154
 kumulativni priraštaj oslobađanja · 213
 kvalitativni mineraloški podaci · 77
 kvalitativni mineraloški uzorci · 10
 kvantifikacija vizuelnih informacija · 84
 kvantitativna analiza u rudnoj mikroskopiji · 107
 kvantitativni mineraloški podaci · 77
 kvantitativni mineraloški uzorci · 10
 kvartiranje · 39

L

Laboratorijska sita · 151
 laboratorijski uzorak · 5
 laserski granulometar · 200
 linijski metod · 122
 linijski uzorak · 6
 lupa · 72

M

Mašine i uređaji za sečenje · 133
 magnetičnost minerala · 291
 magnetohidrodinamički metod · 302
 magnetohidrostatički metod · 302

magnetska indukcija · 294
 magnetska koncentracija · 291
 magnetska osetljivost · 256
 magnetska permeabilnost · 294
 magnetski separator · 301
 magnetski susceptibilitet · 256
 masivna) orudnjenja · 92
 masovni uzorak · 6
 međuproizvod · 279
 mehanički način uzorkovanja · 17
 mehanički razdeljivači · 41
 mehanički stočić · 123
 mehanički uklopljena voda · 49
 mehaničko homogeniziranje · 37
 mehaničko otiranje · 305
 merene vrednosti · 238
 metilenjodid · 265
 metod "šahovskih polja" · 40
 metod "devet tačaka" · 39
 metod Coulter-Counter-a · 199
 metod difrakcije laserskih zraka · 168
 metod kupe · 37
 metod prosecanja kanala · 40
 metod sedimentacije · 168
 metoda Mor-Westfal-ove vage · 184
 metoda pipetiranja · 181
 metoda po Casagrande-u · 185
 metoda Sabanini-jeve natege · 180
 metode elutriacije · 191
 metode hidrometrisanja · 185
 metode stratifikovanih uzoraka · 23
 mikrofotografije · 74
 mikrometerska mrežica · 108
 mikropaner · 273
 mikrosita · 152
 mikroskopske metode merenja · 204
 mikrotvrdina · 116
 mineralna asocijacija · 91
 mineralna facija · 91
 mineralne parageneze · 91
 mineralni sastav sirovine · 71
 mineraloško uzorkovanje · 9
 minimalna masa · 23
 minimalnu masu uzorka · 21
 modalni mineralni sastav · 71
 model oslobađanja · 216
 model prognoziranja · 233
 modeliranje mineralne sirovine · 212
 modul akvizicija · 84
 modul analiza · 85
 modul merenja · 85
 modul za obradu arhiviranih slika · 85
 mogućnost čišćenja uglja · 279
 mohr-ovom vagom · 259
 mohs-ove tvrdine minerala · 96
 mokre · 50
 mokro prosejavanje · 147

N

Ne magnetični minerali · 294
 nemačka sita DIN · 153
 neorganski pepeo · 62
 nerudni minerali · 89

nestandardna laboratorijska sita · 151

O

Objektivi · 106
oblik otiska mikroindentora · 118
obrada uzoraka · 36
obrada uzoraka pulpe · 43
obrada uzorka pulpe · 41
određivanje C_{fix} · 65
određivanje gustine tečnosti · 258
određivanje indeksa sraslosti · 211
određivanje indeksa sraslosti · 211
određivanje koksa · 65
određivanje nasipne mase · 262
određivanje granulometrijskog sastava · 141
određivanje sadržaja koksa · 65
odstranjivanje vlage · 51
oksidaciono žarenje · 295
okulari · 108
okular-mikrometerska mrežica · 121
opalescencija · 93
operativno uzorkovanje · 8
organski pepeo · 62
oslobađanje minerala · 205
oslobađanje minerala · 205
osobine relativne meljivosti minerala · 215
osobine relativne meljivosti minerala · 215
otvaranje sirovine · 206

P

Paramagnetici · 292
parcijalni uzorci · 5
permeabilitet · 296
permeabilnost · 292
piknometar · 257
pliva-tone analiza · 263
pliva-tone analiza uglja · 277
pločice od mesinga · 150
pneumatska sita · 197
Požarickij · 30
pojave stadijnosti oslobađanja · 247
pokazatelj tačnosti uzorkovanja · 48
poliranje - grubo i fino · 134
popravni koeficijent · 238
poprečno zasjecanje · 16
postupak obrade uzorka · 35
potamnjenje · 95
potkovičasti magnet · 296
potpuna oslobodenost · 205
površine kristala · 97
površine preloma minerala · 97
površinska strukturna nagrizanja · 120
površinski uzorci · 6
prah minerala · 94
prečnik sfere ekvivalentne zapremine · 143
presovanje i briketiranje · 135
pribor za izdvajanje uzoraka · 19
pribor za reciklažu · 267
prikazivanja granulometrijskog sastava · 153
primarni (tovarni) uzorak · 5
primeri polarizacionih boja · 109

princip (jednačina) Žia · 34
princip (jednačina) Černenka · 34
princip (jednačina) Bruntona · 34
princip (jednačina) Demond-Halferdala · 29
princip (jednačina) Ričard-Čečota · 25
princip (jednačina) Vezina · 33
principi određivanja minimalne mase · 25
principi sedimentacijske analize · 171
priprema površina zrna · 305
priprema preparata · 131
prividne gustine · 261
prognozna ispitivanja · 78
prognozna modalna ispitivanja · 78
prosejavanje · 145
prosto slučajno uzorkovanje · 17
providnost · 95
prozračnost · 95
pseudomorfizam · 99

R

Racionalna analiza · 85
rad rudnog mikroskopa · 105
rad u imerziji · 122
radioaktivne osobine minerala · 100
radno gorivo · 51
raslojavanje mineralne sirovine · 263
raslojavanje zrna centrifugom · 271
ravnornost orudnjenja · 28
razdeljivačke kutije · 41
reagensi za strukturna nagrizanja · 120
reciklaža teških tečnosti · 266
redukciono prženje · 295
redukciono-oksidaciono žarenje · 295
refleksioni pleohroizam · 112
reflektori · 110
relativna srednja greška · 48
relativno meki minerali · 215
relativno tvrdi minerali · 215
remanentni magnetizam · 294
rezne ploče · 132
rezolucija · 205
Ričard Čečotova formula · 25
ribon metod · 130
Rosin-Rammler-ov dijagram · 159
Rosiwal-Shand metod · 122
ručno prosejavanje · 146
rubikova kocka · 213
rudni minerali · 89
rudni polarizacioni mikroskopi · 73
ruska sita GOST · 153

S

Sabanini metod · 179
sadržaj pepela · 61
sagorljivi sumpor · 61
savršeno oslobađanje · 216
sečenje uzoraka · 131
sedimentacijska centrifuga · 184
sedimentaciona vaga Figurovskog · 172
sedimentaciona vaga Sartorius · 174
sekundarni uzorak · 22

selektivno izdvajanje minerala · 253
 singenetski mineralni uklopci · 62
 sistematske greške · 46
 sistematsko uzorkovanje · 17
 sitovna analiza · 145
 sjaj · 92
 skala tvrđine minerala po Mohs-u · 96
 skenirajući fotosedimentograf · 189
 sklop ruda · 89
 slabo magnetični minerali · 294
 slobodna voda · 50
 slobodnim okom · 72
 slog · 147
 slojni uzorak · 6
 slučajne greške · 46
 slučajni mineralni uklopci · 62
 smeše dva uzorka · 165
 snimanje specimena · 83
 spajanje uzoraka · 161
 specijalni sudovi za zasecanje · 20
 spoljašnji pepeo · 62
 spoljna ili gravitaciona voda · 50
 srasla zrna · 205
 sraslaci · 205
 srednji prečnik zrna · 143
 srednji sadržaj metala · 162
 srednji prečnik · 142
 srednji uzorak · 5
 standardna laboratorijska sita · 152
 standardna sita I.S.A. · 153
 stanja agregacije · 98
 statističke greške · 47
 statistička obrada podataka · 28
 stepen oslobođenosti · 205
 stepen usitnjavanja · 42
 stereobinokularni mikroskop · 101
 stereobinokularni mikroskop · 72
 stohastički model Lin-a · 214
 Stokes-ov prečnik · 141
 stratifikovano uzorkovanje · 17
 struktura rude · 89
 strukture (sklop) preobražavanja · 90
 strukture izdvajanja · 90, 91
 strukture zamenjivanja · 91
 strukturna nagrivanja · 120
 strukturne karakteristike · 208
 sub sitovna analiza · 165
 sumpor · 61
 sumpor u uglju · 65
 superpaner · 272
 suvi proizvodi · 50
 suvo mehaničko prosejavanje · 146
 suvo prosejavanje · 146

I

Šema stereobinokularnog mikroskopa · 101
 šema i grafik uzorkovanja · 14
 šema pripreme i obrade primarnog uzorka · 14

T

Tačkasti integratori · 127

tačkasti uzorci · 7
 teške tečnosti · 263
 tečnost Kleina · 266
 tečnost Kleriči · 265
 tečnost Sušin-Rorbaha · 266
 tečnost Tulet · 266
 tehničke greške · 47
 tehnička analiza uglja · 61
 tehničko uzorkovanje · 10
 tehnološki uzorak · 6
 tehnološko uzorkovanje · 10
 tekture ruda · 89
 termo kompresioni postupci · 136
 Testerov hidrometar · 258
 tetrabrometan · 264
 tipovi areometra · 185
 tipovi objektiva · 107
 tipovi orudnjenja · 92
 tipovi sonde za uzorkovanje · 19
 tok izvođenja pliva-tone · 267
 toplotna moć · 63
 toplotni efekat · 63
 tvrđina · 95
 tvrđina na ogreb · 116
 tvrđina na poliranje · 116
 tvrđina po Vickersu · 96

U

Udeo metala · 162
 ugljenik · 60
 ultrazvučna mikro sita · 198
 ultrazvučno prosejavanje · 149
 ultrazvučno prosejavanje mikrositima · 198
 unošenje popravnog koeficijenta · 230
 unutrašnji refleksi · 114
 unutrašnja voda · 50
 unutrašnji pepeo · 62
 usitnjavanje uzorka · 37
 utvrđivanje zakona raspodele · 233
 uzdužno zasecanje · 16
 uzorak · 5
 uzorak uzet brazdom · 6
 uzorci iz bušotina · 7
 uzorci iz minskih rupa · 7
 uzorci za određivanje vlage · 10
 uzorkovanje · 5
 uzorkovanje na vlažnost · 50
 uzorkovanje stratifikovanog uzorka · 23

V

Van der Plas · 130
 Van der Plas-ov metod traka · 130
 vazdušni elutriator · 196
 vazdušno suv ugalj · 51
 vazdušno-suve materije · 50
 veličina magnetske indukcije · 292
 Vezinova jednačina · 33
 višestepeno uzorkovanje · 17
 Vickers Hardness Number · 96
 Viegner-ova cev · 184
 viskozitet teške tečnosti · 269

vlaga u mineralnoj sirovini · 49
vlaga u uglju · 61
voda u mineralima · 49
vodonik · 60
volatili · 65
vreme trajanja analize · 170
vreme trajanja prosejavanja · 150
vrste prosevnih površina · 151

W

Warman-ov ciklosajzer · 192
Westphal-ova vaga · 259

Z

Zapreminski magnetski susceptibilitet · 292
zbirni uzorci · 6
zeolitska voda · 50
zonalnost minerala · 122

Ž

Žljebasti razdeljivači · 40
žitke materije · 50