



**Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје**  
**Технолошко-металуршки факултет**



**Бошко Бошковски**

**Слободан Богоевски**

# **ПОДГОТОВКА НА МИНЕРАЛНИ СУРОВИНИ**

**- ПРАКТИКУМ ЗА ЛАБОРАТОРИСКИ ВЕЖБИ -**

**Бошко Бошковски**

**Слободан Богоевски**

# **ПОДГОТОВКА НА МИНЕРАЛНИ СУРОВИНИ**

**- ПРАКТИКУМ ЗА ЛАБОРАТОРИСКИ ВЕЖБИ -**

Автори:

Д-р Бошко Бошковски, вонреден професор  
Технолошко-металуршки факултет во Скопје

Д-р Слободан Богоевски, редовен професор  
Технолошко-металуршки факултет во Скопје

Наслов:

ПОДГОТОВКА НА МИНЕРАЛНИ СУРОВИНИ  
- практикум за лабораториски вежби -

Рецензенти:

Д-р Александар Димитров, редовен професор  
Технолошко-металуршки факултет во Скопје

Д-р Горан Начевски, редовен професор  
Технолошко-металуршки факултет во Скопје

Лектура: Ивана Коцевска

Издавач: Технолошко-металуршки факултет во Скопје

Тираж: 60 примероци

Печати: Академска мисла „Партизански одреди“ бр.21/ДП1 - Скопје

CIP - Каталогизација во публикација  
Национална и универзитетска библиотека "Св. Климент Охридски", Скопје  
622.7:553.08]:66.02(075.8)(076)

БОШКОВСКИ, Бошко

Подготовка на минерални сировини : практикум за лабораториски вежби  
/ Бошко Бошковски, Слободан Богоевски. - Скопје : Технолошко-металуршки  
факултет, 2023. - 97 стр. : илустр. ; 24 см  
Библиографија: стр. 97

ISBN 978-9989-650-10-9

1. Богоевски, Слободан [автор]

а) Минерални сировини -- Методи на испитување -- Технолошка подготовка  
-- Висошколски учебници -- Практикуми

COBISS.MK-ID 62698757



**Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје**

**Технолошко-металуршки факултет**



**Бошко Бошковски**

**Слободан Богоевски**

# **ПОДГОТОВКА НА МИНЕРАЛНИ СУРОВИНИ**

**- ПРАКТИКУМ ЗА ЛАБОРАТОРИСКИ ВЕЖБИ -**

**Скопје, 2023**



## ПРЕДГОВОР

Практикумот „Подготовка на минерални сировини“ е напишан според наставните програми на Технолошко-металуршкиот факултет при Универзитетот „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје. Тој е резултат на долгогодишното работно искуство во наставата, односно пресметковните и лабораториските вежби со студентите. Негова основна намена е да претставува суштинско учебно помагало за студентите од студиската програма Неорганичко инженерство и заштита на животна средина. Исто така, може да им послужи и на студентите од студиската програма Металургија, дизајн и менаџмент, како и на инженерите кои работат во индустријата во соодветните области.

Практикумот се состои од три основни дела. Во првиот дел се дадени општите поими за минералните сировини и нивната технолошка подготовка. Во вториот дел се опфатени методите на испитување на минералните сировини, а во третиот методите за нивна подготовка. Секоја лабораториска вежба во практикумот претставува една целина и се состои од теоретски дел, детално опишана постапка за нејзино изведување, како и обработка и дискусија на добиените резултати. Лабораториските вежби се адаптирани во согласност со опременоста на факултетските лаборатории и се изведуваат со практична примена на лабораториски и полуиндустриски машини и апарати.

Од авторите



## СОДРЖИНА

|   |    |
|---|----|
| 1. ВОВЕД . . . . .                                      | 1  |
| 1.1. Општи поими за минералните суровини . . . . .      | 2  |
| 1.2. Општи поими за технолошката подготовка . . . . .   | 3  |
| 2. МЕТОДИ НА ИСПИТУВАЊЕ НА МИНЕРАЛНИТЕ СУРОВИНИ . . . . | 11 |
| 2.1. Земање средна проба за анализа . . . . .           | 12 |
| 2.2. Рендгено-структурна анализа . . . . .              | 15 |
| 2.3. Микроскопски испитувања . . . . .                  | 18 |
| 2.4. Термички испитувања . . . . .                      | 22 |
| 2.5. Физичко-механички испитувања . . . . .             | 27 |
| 2.6. Гранулометриска анализа . . . . .                  | 32 |
| 2.7. Хемиска анализа . . . . .                          | 39 |
| 2.8. Кристалографија . . . . .                          | 47 |
| 3. ТЕХНОЛОШКА ПОДГОТОВКА НА МИНЕРАЛНИТЕ СУРОВИНИ . . .  | 56 |
| 3.1. Дробење . . . . .                                  | 56 |
| 3.2. Мелење . . . . .                                   | 63 |
| 3.3. Противструјно класирање . . . . .                  | 69 |
| 3.4. Центрифугално класирање . . . . .                  | 74 |
| 3.5. Флотациска концентрација . . . . .                 | 80 |
| 3.6. Магнетна концентрација . . . . .                   | 90 |
| 4. ЛИТЕРАТУРА . . . . .                                 | 97 |







## **1. ВОВЕД**

Хемиската технологија опфаќа низа процеси поврзани во една целина, а со цел од почетни суровини да се добие некаков краен продукт кој има соодветна намена. Хемиско-технолошките процеси врз основа на суровините што се применуваат можат да се поделат на неоргански и органски. Неорганската хемиска технологија се дели на технологија на метали, технологија на неметали и технологија на базни неоргански производи.

Во неорганската хемиска технологија доминантно се применуваат природни минерални суровини. Секоја суровина, пред да се примени во некој процес, мора да биде подготвена според одредени стандарди и критериуми, со цел ефикасно да биде искористена во соодветниот технолошки процес. Подготовката на минералните суровини (или скратено ПМС) опфаќа низа на различни операции каде што основните цели се: намалување на димензијата на зрната, класирање на зрната по димензија и концентрирање на корисните компоненти. Од правилната подготовка на минералните суровини ќе зависи нормалното одвивање на технолошкиот процес, како и квалитетот на крајните производи. Начинот и методите што ќе се применат при подготовката зависат од самите суровини, како и од хемиско-технолошкиот процес. Примарно, пред да се започне со подготовката, потребно е да се направат соодветни минерално-хемиски и физички испитувања на минералната суровина, за да се дефинираат особините. Исто така, потребно е детално да се познава технолошкиот процес во кој суровината се применува.

Критериумите, условите и начинот на технолошката подготовка на природните минерални суровини се обработуваат во посебна гранка од науката која едноставно се нарекува **Подготовка на минерални суровини**.

## **1.1. ОПШТИ ПОИМИ ЗА МИНЕРАЛНИТЕ СУРОВИНИ**

Поимот минерална суровина ги опфаќа природните суровини кои се добиваат со експлоатација од лежиштата. Минерално лежиште (наоѓалиште) претставува локалитет каде што е докажана концентрацијата на суровината, односно нејзините резерви. Лежиштата можат да бидат површински или длабински, па експлоатацијата на суровините може да биде со површински или длабински коп.

Минералните суровини добиени при ископ од лежиштето претставуваат смеса од еден или повеќе минерали со различни физички и хемиски особини, сраснати помеѓу себе во разни димензии и форми. Според тоа, минералните суровини по својот состав можат да бидат мономинерални или полиминерални. Мономинерални природни суровини многу ретко се среќаваат, и тоа се претежно самородни метали. Полиминералните суровини се составени од повеќе компоненти кои имаат различен состав и особини, како и различна процентуална застапеност. Компонентите во полиминералните суровини можат да бидат корисни и некорисни. Под корисни компоненти се подразбираат оние компоненти (минерали) кои се потребни за соодветниот технолошки процес. Некорисните компоненти во некоја суровина се оние кои во конкретниот процес не се потребни, но одделно можат да имаат соодветна примена. Притоа процентуалниот удел на корисната компонента варира. Зависно од суровината и технолошкиот процес, и минимален процент на корисна компонента може да е економски профитабилен. Мора да се напомене дека и во некорисниот концентрат се наоѓаат компоненти кои би биле корисни во друг процес, и кои како продукти на подготовката ќе ја зголемат економската ефикасност на експлоатацијата. Затоа, тенденција е природните минерални суровини да имаат соодветна технолошка подготовка.

Во хемиско-технолошките процеси најчесто се користат поголем број на суровини (ретки се технолошки процеси каде се користи само една суровина). Притоа, само дел од суровините, кои квалитативно и квантитативно претставуваат основа за реализирање на процесот, се дефинираат како основни. Останатите суровини кои се користат во истиот процес се споредни, и без нив, исто така, е невозможно да се изведе процесот, но постои можност да се заменат со суровини кои имаат слични карактеристики.

## **1.2. ОПШТИ ПОИМИ ЗА ТЕХНОЛОШКАТА ПОДГОТОВКА**

Поради хетерогениот минералшки состав и недоволната содржина на корисни компоненти, како и различната димензија на парчиња и зрна по ископот, природните суровини не се погодни за директен внес во технолошкиот процес. Поради тоа се наметнува потребата за нивна соодветна технолошка подготовка.

Технолошката подготовка на минералните суровини претставува склоп на повеќе операции на кои се подложува некоја суровина со цел намалување на димензијата на зрната, класирање на зрната по димензија, концентрирање на корисните компоненти и друго. Кои операции ќе се применат при технолошката подготовка зависи од карактеристиките на минералната суровина, но и од хемиско-технолошкиот процес во кој таа се применува. Сите операции при подготовката на минералните суровини можат да се поделат на подготвителни операции, операции на збогатување и помошни операции.

Со подготвителните операции минералната суровина се подготвува за концентрација. Тука спаѓаат операциите на дробење, мелење и класирање. По ископот, суровината се состои од парчиња со различна димензија и форма, што не дозволува директен внес во процесот. Парчињата се уситнуваат со примена на операциите на дробење и мелење, што со заеднички термин се нарекува уште и отворање на суровината, бидејќи доаѓа до ослободување на површините на меѓусебно сраснатите разнородни минерални зрна, со што тие се подготвени за понатамошно процесирање. Со класирањето уситнетата суровина се разделува на класи според димензијата на зрната и специфичната маса. Операции кои доминантно се применуваат за класирање се: просејување на материјалот преку сита (клатни, ротациони, вибрациони), противструјно или центрифугално класирање, и други.

Основната цел при операциите на збогатување (концентрирање) е разделување на корисните од некорисните компоненти во суровината. Разделувањето (сепарацијата) е базирано врз разликите во физичките, физичко-хемиските и хемиските особини на секоја компонента (минерал) во суровината. Такви особини се: специфична маса, магнетизам, хидрофилност или хидрофобност, и други. Методи кои најчесто се применуваат за збогатување се магнетна концентрација, флотација и други.

Помошните операции се неопходни за заокружување на процесот на технолошката подготовка на минералните суровини. Тие не можат да се изостават, затоа што без нив процесот не може да се изведе во целост. Во такви помошни операции спаѓаат: транспорт помеѓу машините, транспорт на готов продукт, обеспрашување, одводнување, сушење, контроли при работа на машините, снабдување со енергија, погонско гориво и други.

Во процесот на технолошката подготовка на минералните суровини цела низа на последователни операции може експлицитно да се претстави преку таканаречени технолошки шеми. Со помош на технолошка шема може полесно да се согледаат во целина сите операции во процесот на подготовка, применетите методи, машини, капацитет, движење на материјалот, реагенси, енергија и добиени продукти. Притоа, зависно од комплексноста, постојат прости и сложени шеми. Простите технолошки шеми вообичаено содржат квалитативни податоци и од нив не може да се согледа бројот, димензијата на машините, реагенси и количества на материјали. Во посложените шеми се содржат и подетални податоци во врска со процесот на подготовка, односно освен квалитативни се наведуваат и квантитативни податоци (капацитет, количество, моќност и останати параметри).

За да се согледа ефикасноста на процесот на подготовка, неопходно е да се дефинираат повеќе показатели (параметри) на тој процес, како: содржина на компоненти на влез и на излез, степен на концентрација на корисните компоненти, принос на продукти на крајот од подготовката, степен на извлекување на корисните компоненти, ефективност на применетите операции и други.

### **Отворање на суровините**

Под терминот отворање на суровините се подразбира примена на операциите дробење и мелење. Отворањето на суровините претставува намалување на димензиите на зрната под дејство на надворешни сили, а со цел да се добијат зрна со определена димензија кои имаат соодветни карактеристики. И двете операции (дробење и мелење) спаѓаат во потполно механички операции, при кои надворешна сила дејствува врз зрната во определен правец со што се прекинуваат кохезионите и ахезионите сили и зрната се распаѓаат на помали зрна. Кај дробилките најчесто се применуваат сили на гмечење, смолкнување и удар, а кај мелниците сили на притисок, триење и удар.

Притоа, освен што се врши намалување на димензијата на минералните зрна, се врши и одделување на сраснатите минерали еден од друг и затоа оваа операција се нарекува „отворање“. По ископот природните суровини најчесто егзистираат во агломерирани зрна со различна димензија и форма, во кои поединечните компоненти (минерали) се нехомогено распоредени. При самото отворање на минералното зрно, под влијание на надворешна механичка сила, се разоруваат и природните врски помеѓу сраснати минерали, па тие се разделуваат во посебни слободни зрна. Појавата на сраснати зрна по отворањето, гледано од аспект на збогатување, е негативна. Сраснати зрна во концентратот на корисна компонента значи намалување на неговиот квалитет, а истата појава во јаловината значи загуба на корисна компонента, односно намалување на степенот на искористување на суровината. Самото отворање зависи видот на сраснатите зрна, па затоа треба да се избере оптимална големина на зрна, при која најголемиот број на зрна ќе биде разделен во однос на различни минерали. Во случај на мономинерална суровина само се врши намалување на димензијата на зрната, до големина неопходна за понатамошна подготовка.

Механичката деструкција на материјалот се одвива во два стадиума. Во првиот стадиум, под дејство на надворешните напрегања, настануваат пукнатини во материјалот, додека, пак, во вториот стадиум доаѓа до ширење (раст) на пукнатините, што на крај резултира со разорување на самото зрно. Од теоретска гледна точка, отпорот на материјалот на разорување може да се изрази преку неговиот отпор на притисок. Односно, за да се разори е потребно да се примени сила која ги совладува кохезионите сили на материјалот.

Практично, дробењето и мелењето спаѓаат во подготвителни операции, но многу често претставуваат и завршни операции во подготовката на некоја суровина, со што таа е подготвена да се примени во некој технолошки процес. Во принцип, операциите на дробење и мелење договорно се одделени врз основа на големината на зрна кои се јавуваат како продукти по примената на овие операции:

- |                      |               |          |
|----------------------|---------------|----------|
| - Примарно дробење   | 1000 – 200 mm | (крупно) |
| - Секундарно дробење | 200 – 30 mm   | (средно) |
| - Терцијарно дробење | 30 – 5 mm     | (ситно)  |
| - Мелење             | под 5 mm      | (фино)   |

Ова е ориентациона поделба затоа што кај определени специфични случаи и материјали дробење може да се врши и до 1 mm (меки материјали, глина, талк и други). Мора да се истакне дека со примена на овие операции никогаш не може да се постигне потполно одвојување на зрната (односно, минералите) во агрегатите, затоа што такво нешто бара долготрајно отворање (долго мелење) на материјалот, што нема економска оправданост. Тоа е ограничено, пред сè, од техничката совршеност на машините кои се користат за дробење и мелење. Затоа секогаш постои тенденција при дадени услови да се постигне оптимален степен на отворање. Посматрајќи ја наведената поделба на дробење и мелење, исто така, мора да се истакне дека не секогаш се применуваат таквите степени на отворање. Во пракса може да има и помалку но и повеќе степени на отворање, што зависи од структурата на материјалот, како и од потребите на технолошкиот процес за кој е наменет.

### **Класирање на сировините**

Класирањето е помошна операција во подготовката на минералните сировини, која се применува со цел претходно издробен и сомелен материјал да се класира во одделни класи во тесни граници на димензии на зрна. Тоа е потребно од практични причини, затоа што материјалот по уситнувањето излегува од машините со хетероген гранулометриски состав, па соодветното класирање во тесни граници на димензии на зрна е неопходно за понатамошната подготовка (пред сè, за концентрирање), како и при примена на материјалот во технолошкиот процес.

За класирање доминантно се применува разликата во брзините при движење во некој флуид, под влијание на гравитациона и центрифугална сила. Во машините за класирање (класификатори) струи флуид, најчесто и најевтино вода или воздух. Многу поретко се користат други флуиди, поради економски причини. Во случај да е неопходно се користи инертен флуид кој нема да реагира со материјалот. Треба да се напомене дека гравитационата сила е присутна во сите видови на класирање, како примарна или како секундарна. Кога е применета како примарна, методите за класирање имаат двојна цел – да класираат мономинерални сировини кои се составени од зрна со иста специфична маса, во класи на различни димензии на зрна, како и да се класираат полиминерали сировини составени од различни компоненти со иста димензија на зрна, во класи со различна специфична маса.



Теоретски, класирањето би требало да се врши исклучиво врз основа на големина на зрна, при што треба да се отстранети сите други фактори кои влијаат на операцијата. Поради различната димензија, разделувањето на суровините се базира на разликата во брзината на движењето на зрната во некој флуид под влијание на гравитационата сила или центрифугалната сила (вклучувајќи го и отпорот на триење). Но, разлика во брзината на движење на минералните зрна во соодветниот флуид (медиум) има и поради разликата во специфичната маса. Според тоа, многу е реално да се очекува при класирање на некоја природна (полиминерална) суровина да се добие како продукт мешавина на зрна од разни класи во однос на димензијата и специфичната маса, но со иста релативна брзина на движење во применетиот флуид (помало зрно но со поголема специфична маса ќе биде во иста класа со поголемо зрно од друга компонента со помала специфична маса). Затоа, многу е важно при конструкција на машините кои се користат при класирање (класификатори) да се намали влијанието на сите други параметри. Големината на зрната кои се издвојуваат со класификатори треба да се движи во тесни граници на димензии на зрна (најчесто 0 – 1 mm), за да има правилно класирање. Покрај големината (димензијата) и формата на зрното, важни параметри при класирањето се и специфичната маса на зрното, како и специфичната маса на флуидот низ кој зрното се движи.

При примена на која било сила за разделување (класирање) на минерални зрна, мора да се смета на тоа дека на нив ќе се спротивстават и силите на отпор при движење на зрната низ флуидот, кој ќе го намалува дејството на применетите сили. Со струењето на флуидот се влијае врз движењето на минералните зрна, така што зрната кои се движат побавно се двојат на една страна, а оние кои се движат побрзо на друга. Односно, оние зрна кои се „движат“ побавно ќе бидат однесени од водената (воздушната) струја, а потешките минерални зрна кои се „движат“ побрзо ќе се исталожат на дното од садот.

Класирањето се изведува во специјално конструирани машини наречени класификатори. Најчесто во употреба се класификатори кои издвојуваат две класи: песок и прелив, но постојат и такви кои издвојуваат (класираат) и повеќе класи. Под песок се подразбира крупната класа која паѓа на дното од класификаторот, а под прелив се подразбира ситната класа која е носена од флуидот надвор од класификаторот.

Кај класификаторите мора да се обезбеди непречно движење на зрната по резултанта на силите кои дејствуваат на нив, како и по нивниот транспорт надвор од класификаторот (самостојно или со некој дополнителен уред). Класирањето се реализира со помош на различни машини и апарати, како што се хидраулични и механички класификатори, аероциклони и хидроциклони, хидросепаратори, сита и подвижни сита (клатни, ротациони, вибрациони) и други. Тие во индустриски услови најчесто работат континуирано, но во лабораториски услови работат дисконтинуирано.

Бидејќи класирањето секогаш се врши во некој флуид, најчесто вода или воздух, за ефикасна работа претходно мора да се подготви соодветна суспензија, која најчесто е многу ретка, така што соодносот цврсто:течно изнесува 1:10, но во специфични услови може да се работи и со погусте суспензии (од 1:3 до 1:4).

Доколку за класирање се применат сита, разделувањето е исклучиво според димензијата на зрната. Добиените класи се во релативно тесни граници на димензии на зрна. Обележувањето на класите се врши на соодветен начин: (+ 1 mm); (- 1 mm + 0,063 mm); (- 0,063 mm); итн. Притоа класата (+ 1 mm) ги содржи сите зрна кои се поголеми од 1 mm, класата (- 1 mm + 0,063 mm) содржи само зрна чија големина е помала од 1 mm а поголема од 0,063 mm. Класата (- 0,063 mm) содржи само зрна со димензија под 0,063 mm.

### **Концентрирање на суровините**

По завршување на сите подготвителни операции, односно по извршеното отворање на суровина и класирање на зрната според димензија, може да се пристапи кон фаза на концентрирање на суровините. Концентрирањето или збогатувањето на суровините претставува разделување на корисните од некорисните компоненти во посебни концентрати, базирано на нивните различни физички и хемиски особини. Целта на концентрирањето е да се добие продукт во кој максимално ќе биде застапен корисниот минерал (минерали) со минимални примеси на други минерали. Тој продукт (фракција) каде што се одделени (сепарирани) корисните компоненти се нарекува концентрат. Некорисните компоненти се концентрираат во јаловина. Доколку повеќе минерали се концентрираат во еден концентрат, тогаш се работи за колективна концентрација, а доколку се концентрира само еден минерал, тогаш се работи за селективна концентрација. Во фракцијата каде се концентрира јаловината е дозволено само минимално количество од корисните минерали.

Разделувањето (сепарацијата) на различните компоненти во посебни концентрати се врши со помош на дејствување на определени сили, под чие влијание минералите во некој флуид се разделуваат помеѓу себе. Такви применети сили се, пред сè, гравитациона сила, центрифугална сила, сила на отпор на движење низ флуид, сила на потиснување, магнетна сила, електрична сила, хидрофобност, боја, сјај и други. Самите минерални зрна при разделувањето можат да се движат во разни правци: надолу, нагоре, косо, хоризонтално итн. Правецот на движење е строго определен и е резултанта на сите сили кои дејствуваат на минералното зрно.

Пред да се пристапи на концентрирање, минералната суровина мора да ги има поминато подготвителните операции во процесот на технолошка подготовка. Минералната суровина треба да биде уситнета до потребната големина, како и соодветно класирана според димензијата на зрна. При отворањето не може никогаш да се постигне потполно разделување на минералите сраснати во едно зрно. Поради тоа, дел од еден минерал останува сврзан за друг во исто зрно, но прашање е колкава е содржината на таквиот остаток. Поради тоа, и при концентрирање не може да се изврши потполно разделување на минерали во поединечни концентрати, па затоа се тежи да се изврши оптимално разделување. Притоа се случува, поради несовершеноста на машините или поради погрешни работни услови, и дел од отворени некорисни компоненти да се одделат во корисен концентрат и обратно. Затоа, операциите на концентрирање се повторуваат повеќекратно, за да се зголеми ефикасноста, а со тоа и степенот на чистота на концентратите, како и самото искористување на суровината.

Така се добиваат релативно чисти концентрати, потоа меѓупродукт (мешавина на минерали) и јаловина. Меѓупродуктот, со дополнително отворање и промена на параметрите на концентрирање, најчесто повторно се враќа на концентрирање, со што се зголемува економскиот ефект на искористување на суровината. Затоа при концентрирање е потребно да се постигне оптимален степен на искористување на суровината, но истовремено и да се запази економичноста на применетите операции, за да се оствари и добивка во работењето.

Во процесот на подготовка има влезна суровина ( $BC$ ) која се разделува на еден или повеќе концентрати ( $K_1, K_2, \dots, K_n$ ) и на јаловина ( $J$ ), па според тоа соодветниот биланс би бил:

$$BC = K_1 + K_2 + K_3 + \dots + K_n + J$$

Овој биланс мора да биде усогласен, како по вкупна маса, (општ) така и по маса на компоненти (парцијален). Односно, влезот е 100 %, па и сумата на масените проценти на сите концентрати (заедно со јаловината) треба да изнесува 100 %. Исто така, и уделот (процентот) на еден минерал во влезната суровина е еднаков на сумата од удели на минералот во концентратите.

Со оглед на тоа дека минералите се разликуваат помеѓу себе со различни особини, според таквите особини ќе се избере и најпогодна метода за концентрирање. Методите кои се применуваат за концентрирање се поделени во зависност од физичките и хемиските особини, како и од применетите сили кои дејствуваат при разделувањето. Основни три методи кои доминантно се применуваат се: гравитациска концентрација, магнетна концентрација и флотациска концентрација.

Гравитациската концентрација се врши во средина на некој флуид (вода, воздух, тешки течности итн.). Притоа, разделувањето е под влијание на гравитационата сила, поради разликите во специфичната маса на компонентите (минералите) и димензијата и формата (обликот) на зрната.

Разликата во однесувањето на минералите во магнетно поле се применува при магнетна концентрација. Во работната зона (магнетното поле) на магнетните сепаратори минералните зрна кои имаат магнетни особини се привлекуваат кон соодветниот пол на магнетното поле и се концентрираат како магнетна фракција, а останатите минерални зрна се сепарираат како немагнетна фракција.

Флотациската концентрација се базира на разликата во површинските особини на минералните зрна. Тоа се однесува на фактот дали минералното зрно е хидрофилно или хидрофобно. Доколку мешавина од такви зрна се потопи во вода, и се вдувува гасна фаза (воздушни меурчиња), хидрофобните зрна ќе се прилепат за меурчето воздух и заедно со него ќе испливаат на површината. Спротивно на тоа, хидрофилните зрна ќе се наквасат и како талог ќе останат на дното.

## **2. МЕТОДИ НА ИСПИТУВАЊЕ НА МИНЕРАЛНИТЕ СУРОВИНИ**

За ефикасно да се реализира процесот на подготовка, неопходно е да се познаваат минералошките, физичките и хемиските карактеристики на суровината, како и соодветниот технолошки процес за кој се наменети. Затоа, примарно, пред да се започне со подготовка, се зема репрезентативна средна проба од суровината на која се спроведуваат детални минералошки, физички и хемиски испитувања со цел да се определат нејзините особини.

Со минералошките испитувања се дефинираат присутните минерални компоненти во природната суровина. Притоа, како методи доминантно се применуваат рендгено-структурна анализа (XRD) и оптичка микроскопија.

Со хемиската анализа квалитативно и квантитативно се дефинира составот на суровината во однос на присутни елементи (најчесто претставени како оксиди), загуба на маса при жарење на карактеристични температури и друго. Хемиската анализа може да се надолнува со пресметковна рационална анализа, со која се утврдува процентот на присутни минерали (идентификувани со рендгено-структурна анализа) врз база на определените оксиди.

Физичките анализи на минералната суровина опфаќаат определување специфична маса, волуменска маса, порозност, јачина на притисок, гранулометриски состав и други параметри. Термичките карактеристики на материјалот се определуваат со диференцијално-термичка анализа (DTA) и термогравиметриска анализа (TGA).

Контролни анализи се реализираат во текот на целиот процес на подготовка. Константно се врши проверка на квалитетот на меѓуфазните продукти за да се обезбеди константен квалитет на подготвениот концентрат, со цел негова ефикасна примена во соодветниот технолошки процес.

## 2.1. ЗЕМАЊЕ СРЕДНА ПРОБА ЗА АНАЛИЗА

Кога се прима суровина за анализа таа треба да биде и соодветно обележана. Ознаката треба да ги содржи видот и количеството на суровината, како и локалитетот и датумот на земање. Тоа обележување ја следи суровината низ целиот процес на подготовка, при што се додаваат дополнителни обележувања (за секоја фаза од подготовката). Примарно треба да се направи и макроскопски опис на суровината. Имено, суровините се разликуваат помеѓу себе по боја, големина на зрна (парчиња), текстура, структурен изглед (различни кристали и сл.). Исто така, мора да се наведе дали суровината е онечистена со површински примеси (мов, кал, и сл.).



**Слика 1.** Макроскопска слика на суровина (калцит)

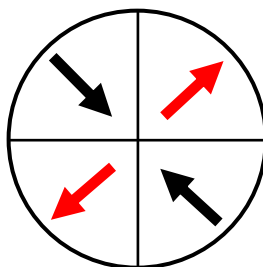
Со оглед на фактот дека пробите од терен (рудник, ископ или сл.) се земаат во поголемо количество и можат да потекнуваат од различни места (по хоризонтала или вертикала), а се во вид на парчиња (со различни димензии), мора да се земе таканаречена средна проба. Таа мора да биде репрезентативна, што значи во земеното количество суровина за анализа мора да се содржани пропорционално сите поединечни компоненти со соодветните карактеристики. Основните карактеристики на една природна минерална суровина се определуваат исклучиво од таканаречена „средна проба“ која претставува соодветно помало количество материјал земено од суровината.

Средната проба мора да го претставува материјалот со сите минералоски, физички и хемиски карактеристики.

Средна проба се зема по точно определени критериуми, најчесто стандардизирани и со државни стандарди. Тоа е неопходно, бидејќи несоодветно земање средна проба може да даде погрешна слика за суровината. Од непрописно земената средба проба може да се добијат резултати од анализите кои не ја отсликуваат реалната состојба на суровината, што може да резултира со низа на последователни отстапувања и грешки, како во подготовката, така и во технолошкиот процес.

Зависно од местото и состојбата на суровината на терен, се определува и начинот на земање, како и количеството на средната проба. Иако постојат бројни аналитички изрази за определување количество на средна проба од терен, сепак, најчесто таа се зема по искуство. За покрупно зрнести и покомпактни материјали се зема поголемо количество материјал, а за поситно зрнести и растресети материјали помало количество. Самото земање средна проба може да биде рачно или машинско. Рачното земање средна проба обично се користи кај суровини или готови продукти, а машинско во текот на процесот (од лента и сл.).

По прием и опис на пробата, таа се раздробува на поситни парчиња кои се мешаат. Потоа, со метода на квартирање се редуцира количеството на материјал. Материјалот се поставил на рамна основа во вид на сплесната купа, која се дели со дијагонали на четири дела и се мешаат два спротивни дела, а другите два дела се отстрануваат (слика 2.). Операцијата се повторува сè до добивање на потребното количество материјал, таканаречената средна лабораториска проба наменета за понатамошни испитувања.



**Слика 2.** Земање средна проба со метода на квартирање

Земањето средна проба може да се повторува пред и по секоја фаза во подготовката, а количеството на земената проба ќе зависи од видот на испитувањата и операциите кои треба да се реализираат. Средната проба се обележува како и сите други проби, со ознака „средна проба“.

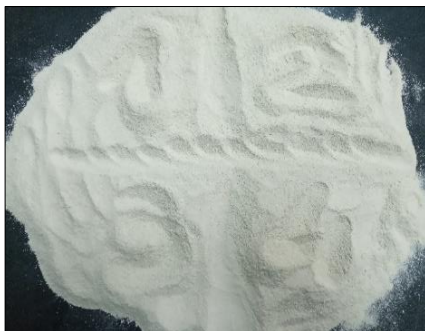
## Лабораториска вежба

Примарно е потребно да се направи прием на суровината. Да се дефинира видот и количеството на суровината, како и локалитетот и датумот од каде што е доставена. На пример: на 15.4.2023 е доставен доломит од лежиштето Чајле во количина од 20 kg. Потоа треба да се направи макроскопски опис. Потребно е да се дефинира бојата, големината на парчиња, текстурата, како и да се наведе дали суровината е онечистена со површински примеси и какви.



**Слика 3.** Примерок за макроскопски опис на суровината

По приемот и описот на суровината, таа се раздробува. Потоа е потребно да се земе средна проба. Доколку материјалот е компактен, треба пред да се уситни (за минералошко-петрографски и физички испитувања) да се зачуваат и покрупните парчиња. Материјалот се поставила на рамна површина во вид на пресечена купа, а потоа таа се дели на 4 дела. Двата спротивни се отфрлаат, а останатите два се спојуваат, па постапката се повторува сè до добивање соодветно мало количество средна проба, потребно за анализи.



**Слика 4.** Земање средна проба со метода на квартирање

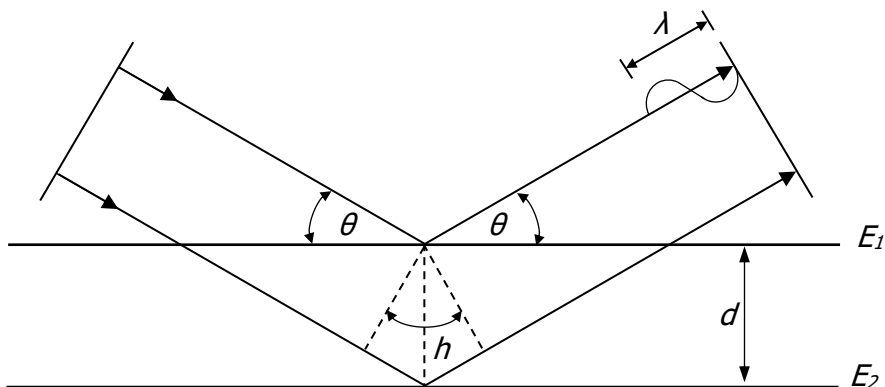


## 2.2. РЕНДГЕНО-СТРУКТУРНА АНАЛИЗА

Рендгено-структурната анализа покажува најдобри резултати при идентификацијата на присутните минерали, односно при квалитативна анализа на минералите во суровините, а поретко се применува за квантитативна анализа. Оваа анализа ја детерминира структурата на кристалната решетка, односно положбата и растојанието помеѓу атомите, растојанието помеѓу кристалните рамнини, како и одредени деформации и дефекти во самата кристална решетка.

Рендгенските или  $X$ -зраците се генерираат во специјални рендгенски цевки кои имаат издолжена форма, и од кои е евакуиран воздухот. Во нив се сместени катода и анода. Емисија од брзи електрони се создава од катодата. Притоа тие се судираат со атомите од антикатодата, при што доаѓа до интеракција. Поради големата брзина што ја имаат електроните, при сударот избиваат електрони од  $K$ -слојот од атомите од антикатодата. Сега овие слободни места во  $K$ -слојот се пополнуваат со електрони од  $L$ -слојот, при што електроните го емитираат вишокот на енергија, во облик на рендгенски зраци.

Рендгенските зраци претставуваат електромагнетни бранови со бранова должина од 0,001 до 10 nm. За рендгено-структурните анализи се применуваат рендгенски зраци со точно определена бранова должина ( $\lambda$ ). Рендгено-структурната анализа се базира на можноста рендгенските зраци да продираат низ кристалните материјали, и можноста за нивна дифракција од структурните единици на кристалот (атоми, јони и молекули).



Слика 5. Дифракција на рендгенски зраци

Кога монохроматски сноп од паралелни рендгенски зраци ќе наиде на кристал, најголем дел од нив ќе помине низ него, а само мал дел ќе се рефлектира од кристалните рамнини во кои се распоредени атомите. Рендгенските зраци се рефлектираат така што упадниот (влезен) агол е еднаков со рефлектираниот (излезен) агол. Притоа рефлектираните зраци меѓусебно интерферираат, поради што доаѓа до зголемување или намалување на нивниот интензитет. На слика 5 е презентирани сноп од рендгенски зраци кој паѓа на кристал со упаден агол  $\theta$ .

До интерференција и зголемување на интензитетот на рефлектираните зраци ќе дојде само доколку разликата во патот што го минуваат (што го претставува растојанието  $d$  помеѓу кристалните рамнини  $E_1$  и  $E_2$  од кои се рефлектираат) е повеќратна за цел број во однос на брановата должина ( $\Delta = n \cdot \lambda$ ). Притоа до интерференција со максимална амплитуда ќе дојде само при определени услови кои се дефинирани со Бреговата равенка, која се користи за определување на меѓуатомското растојание.

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$$

каде е:

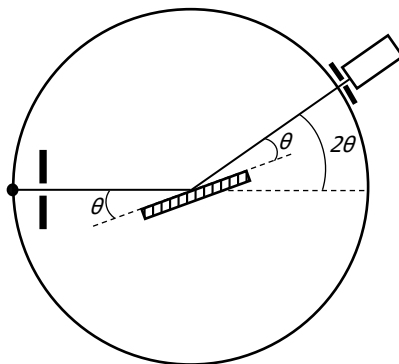
$n$  – цел број (1, 2, 3,...);

$\lambda$  – бранова должина на рендгенските зраци;

$d$  – меѓуатомско растојание;

$\theta$  – упаден агол.

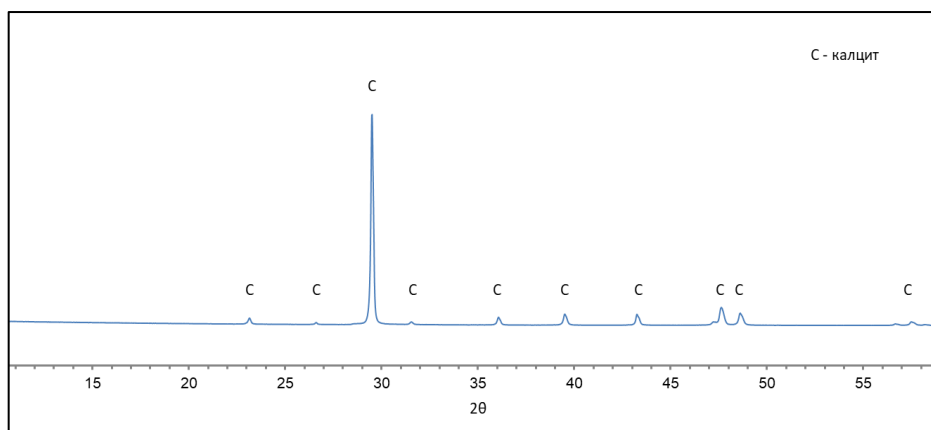
Дифрактометарот го регистрира соодветниот интензитет на рефлектираните зраци од кристалната решетка на испитуваната суровина. Основни елементи на дифрактометарот се: рендгенска цевка, гониометар кој обезбедува кружно движење на држачот на кој се наоѓа испитуваниот примерок во интервал од 0 до 360°, како и детектор за зраците. Рендгенскиот зрак најпрво поминува низ отвор кој ја ограничува дивергенцијата, а потоа паѓа на испитуваниот примерок кој е во прашкаста состојба во форма на тенка плочка со површина од околу 1 – 2 cm<sup>2</sup>. Дифрактираниот зрак потоа поминува низ уште еден отвор и паѓа на детекторот, Гајгер-Милеров бројач кој го регистрира интензитетот на дифрактираните зраци. Поврзан е со електронски уред кој ги регистрира квантните зрачења што ги прима детекторот, за преку печатач како излезни податоци да се добие дифрактограм со карактеристични дифракциони максимуми таканаречени пикови.



**Слика 6.** Шема на дифрактометар

Висината на пикот е пропорционална на интензитетот на дифракциониот ефект. На дифрактограмот, исто така, се регистрира вредноста на упадниот агол  $2\theta$ . Секој минерал има свој карактеристичен дифрактограм со соодветни пикови, при точно определена вредност за  $2\theta$ , поради што рендгено-структурната анализа има најголема примена при идентификацијата на минералите.

На следната слика како пример е презентиран дифрактограм на суровина калцит.



**Слика 7.** Дифрактограм на суровина калцит

### 2.3. МИКРОСКОПСКИ ИСПИТУВАЊА

Микроскопијата овозможува квалитативна и квантитативна анализа на минералите. Се базира на трансмисија и рефлексија на светлината, при што може да се добие зголемување и до 1500 пати што овозможува да се опсервираат честици со димензии до 0,01 mm.

Микроскопот се состои од: објектив, окулар, анализатор, поларизатор, сталак, тубус, микроскопско столче со механизам за регулирање на положбата, и друго. Најважни делови на микроскопот се објективот и окуларот кои се сместени во тубусот на микроскопот. Објективот е оптички дел кој директно се насочува кон објектот кој е цел на опсервација. Тој создава реална, зголемена и превртена слика на објектот, таканаречена меѓуслика. На него е означено зголемувањето што го создава. На окуларот се потпира окоето при опсервацијата на препаратот. Тој дополнително ја зголемува сликата, но ја дава во реална исправена состојба. И на него исто така, е означено зголемувањето што го дава. Вкупното зголемување што се добива е производ од поединечните зголемувања на објективот ( $U_1$ ) и окуларот ( $U_2$ ).

$$U = U_1 \cdot U_2$$

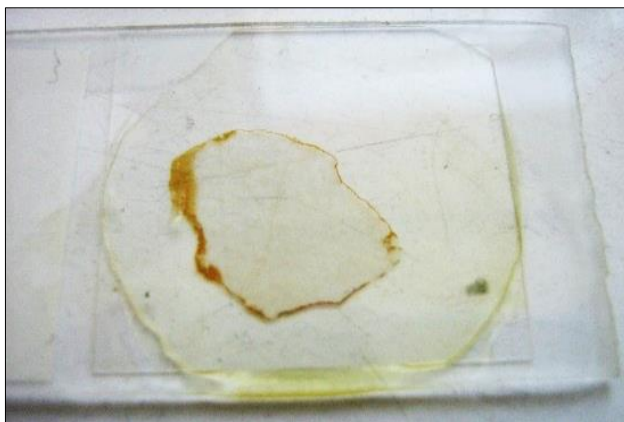
Најчесто во долниот дел на тубусот е поставен ротационен диск на кој се поставени повеќе објективи со различно зголемување. Непосредно под препаратот е поставен поларизаторот, кој линеарно ја поларизира светлината. Тој уште се нарекува и турмалинска плочка или поларизационен филтер кој овозможува светлината што паѓа на испитуваниот објект да има вибрации само во една насока, нормална на насоката на зракот. Поларизациониот микроскоп има две Николови призми. Во тубусот на микроскопот е поставен анализатор кој служи за анализа на појавите кои се случуваат при поминување на линеарно поларизираната светлина низ примерокот.

Поларизационите микроскопи може да бидат трансмисиони или рефлексионни. Кај трансмисионите поларизациони микроскопи уредот за осветлување е поставен под столчето, а се состои од едно двострано огледало. Кај рефлексионите поларизациони микроскопи, кои уште се нарекуваат и металогрфски микроскопи бидејќи најчесто се применуваат за рудни испитувања поради особината на рудните минерали силно да ја рефлектираат светлината, за тубусот е поврзан илуминатор – стаклена призма која служи како светлосен рефлектор.



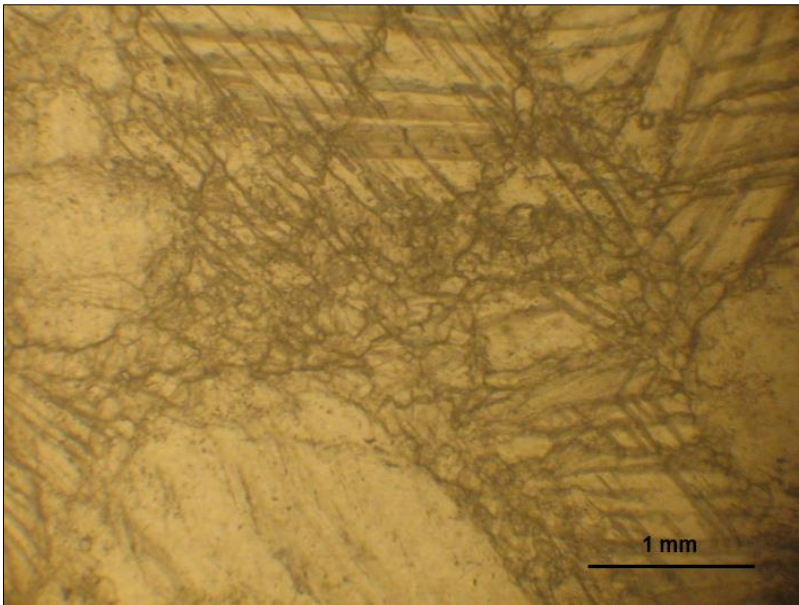
**Слика 8.** Оптички трансмисионен микроскоп SM-POL Leitz-Wetzlar

За даден материјал да може микроскопски да се анализира, потребно е да се подготви соодветен препарат со дебелина на слојот од околу од 40  $\mu\text{m}$ , за да овозможи трансмисија на светлината.

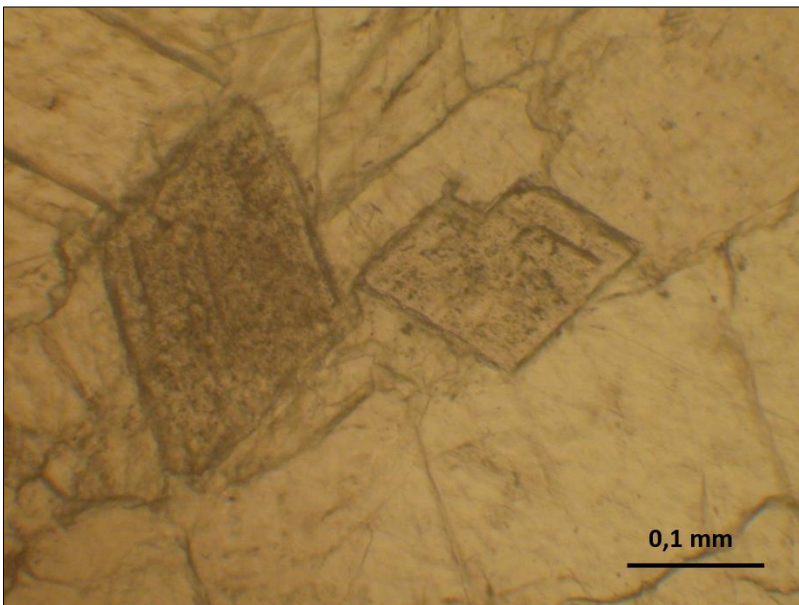


**Слика 9.** Микроскопски препарат

Оптичките трансмисиони микроскопи доминантно се применуваат за идентификација на минералите, определување на обликот, големината и контактите на зрната, детерминација на микроструктурата и друго. Како пример се дадени слики од микроскопска анализа на калцит.



**Слика 10.** Фотографија од оптичка трансмисиона микроскопија – изометрични калцитни зрна со варијабилна дебелина од околу 0,1 – 0,5 mm до 1 – 2 mm



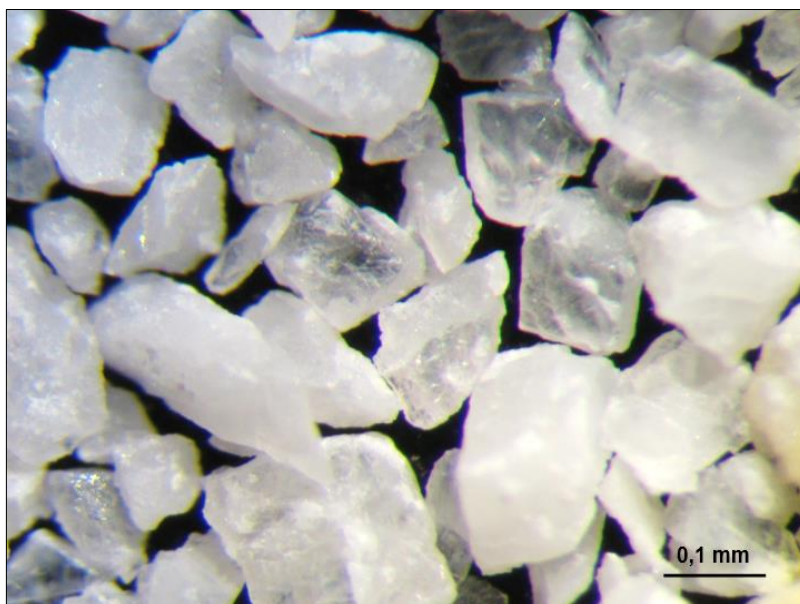
**Слика 11.** Фотографија од оптичка трансмисиона микроскопија – идиоморфно ромбедарски доломитни кристални зрна инкорпорирани во основна калцитна маса

При технолошката подготовка на сировините многу често се користи и бинокулар. Бинокуларот е варијанта на оптички микроскоп со помало зголемување (најчесто до околу 100 пати) кој работи на принципот на рефлексија на светлината.



**Слика 12.** Бинокулар Carl Zeiss Jena

Доминантно се применува за детерминација на обликот и големината, како и видот на минералните зрна добиени при различни стадиуми од процесот на подготовката.

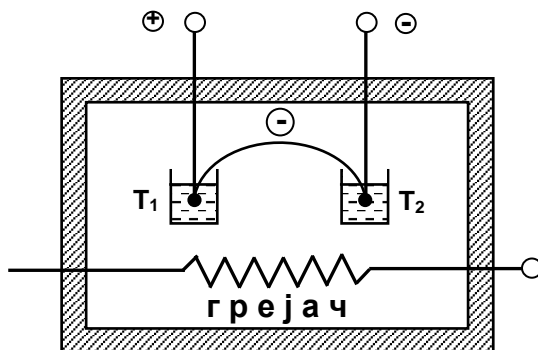


**Слика 13.** Калцит – димензиона фракција на зрна (+ 0,1 mm) од мокра ситова анализа по дробење на дробилка со валци

## 2.4. ТЕРМИЧКИ ИСПИТУВАЊА

### Диференцијално-термичка анализа (ДТА)

Диференцијално-термичката анализа се применува за испитување на термичките карактеристики на материјалите. Се базира на компарација на термичките својства на испитуваниот примерок во однос на референтен, термички инертен материјал. Инструментот ја регистрира температурната разлика ( $\Delta T = T_1 - T_2$ ), помеѓу испитуваниот примерок ( $T_1$ ) и референтниот материјал ( $T_2$ ), при загревање или ладење со константна брзина, при исти услови.



**Слика 14.** Шематски приказ на диференцијално термичка анализа

Појавата на температурна разлика помеѓу испитуваниот и референтниот материјал е условена од промената на енталпијата на материјалот, а се јавува како последица на одвивањето на некој процес во него. Тие процеси се многубројни, а најчести се: дехидратација, дисоцијација, фазни трансформации, оксидација, редукција, топење, испарување, разложување на кристалната решетка и други. Овие трансформации се проследени или со ослободување или со апсорбирање топлина. Ендотермните ефекти настануваат како резултат на фазни трансформации, дисоцијација, дехидратација, редукција и друго, додека, пак, егзотермните ефекти настануваат при кристализација, оксидација и како резултат на некои процеси на разложување на материјалот.

Можноста термичката анализа да се користи за идентификација и за следење на промената на фазниот состав во текот на загревањето се базира на повеќе факти. На секоја промена на материјалот која се одигрува во текот на загревањето или ладењето, одговара соодветен топлотен ефект кој се евидентира



на термограмот како зависност на температурната разлика на термопарот во функција од температурата или времето  $\Delta T = f(T \text{ или } t)$ . Сите топлотни ефекти кои се регистрираат на термограмот се карактеристични за испитуваната супстанција и се одигруваат на точно дефинирани температури или температурни интервали. Карактерот на процесите на промените во испитуваната супстанција, во текот на загревањето или ладењето, се одразува на геометрискиот облик на кривата.

Диференцијално-термичката анализа (DTA) ја дава зависноста на температурната разлика помеѓу испитуваниот и референтниот материјал во функција од температурата или времето. Во случај на егзотермен процес, поради ослободување топлина, температурата на примерокот побрзо расте, па на кривата на загревање на примерокот се јавува побрз раст на температурата, а на DTA кривата температурната разлика оди во позитивна насока. При ендотермен процес, како последица на потрошената топлина за негово одвивање, на кривата на загревање на примерокот се јавува побавен раст, па на DTA кривата се регистрира отклон во негативна насока.

Постапката за DTA се состои во снимање на кривата при загревање или ладење, анализа на температурните ефекти кои се јавуваат во облик на ендотермни и егзотермни пикови, и пронаоѓање на врската помеѓу добиената крива и карактеристиките на испитуваната супстанција. Геометрискиот облик на DTA кривата зависи од низа фактори. Фактори поврзани со карактеристиките на примерокот и на референтниот материјал, фактори поврзани со условите на изведување на експериментот, и фактори поврзани со карактеристиките на апаратурата. За влијанието на карактеристиките на примерокот и на референтниот материјал треба да се земе предвид масата, гранулацијата и специфичната маса на примерокот, а кај референтниот материјал и видот на материјалот кој се користи. Овие фактори значајно влијаат на основните елементи на DTA кривата, како што се: отстапување на DTA кривата од нултата линија, симетријата на добиениот пик, температурата на почетокот, максимумот и крајот на пикот, висината на пикот, површината на пикот итн. Површината на пикот зависи од големината на енталпијата на процесот во испитуваниот примерок кој се одигрува во текот на загревањето или ладењето, при константни останати услови. Највлијателни фактори поврзани со изведувањето на експериментот се: влијанието на термоелементот (дебелина и положба), влијанието на брзината на загревање, влијанието на атмосферата во текот на изведувањето на анализата,

почетната температура на печката и друго. Влијанието на апаратурата на текот на DTA кривата посебно е изразено преку преносот на топлина од грејачот до примерокот, а потоа и низ примерокот до врвот на термоелементот. Тоа зависи од обликот на држачот и од видот на материјалот од кој е направен.

Материјалот кој се испитува најчесто се меле во порцелански аван до прашкаста состојба. Потоа со референтниот материјал (кој исто така е во прашкаста состојба), посебно се ставаат во две платински лончиња, и се поставува по еден крај од термопарот во секое лонче. Потоа се поставуваат на огноотпорни држачи и се внесуваат во печката. Доколку при загревањето дојде до некаква промена кај испитуваниот материјал која резултира со ослободување или апсорпција на топлина, како последица на разликата во електромоторните сили на термопарот ќе се јави напонска разлика, која се регистрира со електронски потенциометар.

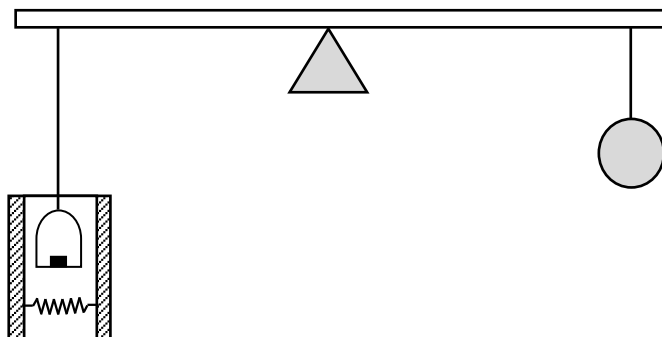
Денес постојат бази на податоци со DTA кривите за скоро сите минерали кои се применуваат во неорганската хемиска технологија.

### **Термогравиметриска анализа (TGA)**

Термогравиметриската анализа, исто така, се применува за испитување на термичките карактеристики на материјалите (сировините). Се базира на мерење на промената на масата на испитуваниот примерок при загревање или ладење. Температурите при кои се одигруваат овие процеси (промена на маса) се карактеристични за секој минерал засебно, и можат да послужат за негова идентификација, односно за квалитативна анализа на испитуваната сировина. Истовремено термогравиметриската анализа се користи и за квантитативни испитувања, бидејќи промената на масата на испитуваниот примерок директно зависи од масениот удел на поединиот минерал во природната сировина.

Термогравиметриската анализа (TGA) претставува погодна метода на термичка анализа за следење на физичко-хемиските процеси на повисоки температури, при кои доаѓа до промена на маса на испитуваниот примерок. Тоа најчесто се процеси на испарување, оксидација, редукција, дехидратација, дехидроксилација, дисоцијација итн. Со примена на термогравиметриската анализа од регистрираните промени на маса во функција од температурата и времето може да се добијат важни и прецизни податоци, како за термичката стабилност на сировината, содржината на разни видови вода, температурата на разложување, кинетиката на реакцијата итн.

Термогравиметриската анализа може да биде статичка и динамичка. Кај статичката изотермичка термогравиметриска анализа испитуваниот примерок се загрева дисконтинуирано и се одржува на константна температура. Кај динамичката термогравиметриска анализа испитуваниот примерок се загрева континуирано (најчесто со константна брзина на загревање), при што се регистрира секоја промена на маса во функција од температурата. Софистицирани инструменти за термогравиметриска анализа работат со минимална количина од испитуваниот примерок и ја регистрираат и најминималната промена на маса со голема прецизност во широк температурен интервал од  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $2400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Нудат можност испитувањето да се изведува во статичка или динамичка атмосфера, како и во вакуум, бидејќи се снабдени со систем на пумпи. Имаат дигитален излез, односно можност за поврзување со компјутер, како и можност за поврзување со други инструменти со цел да се добијат попрецизни резултати и повеќе аналитички податоци.

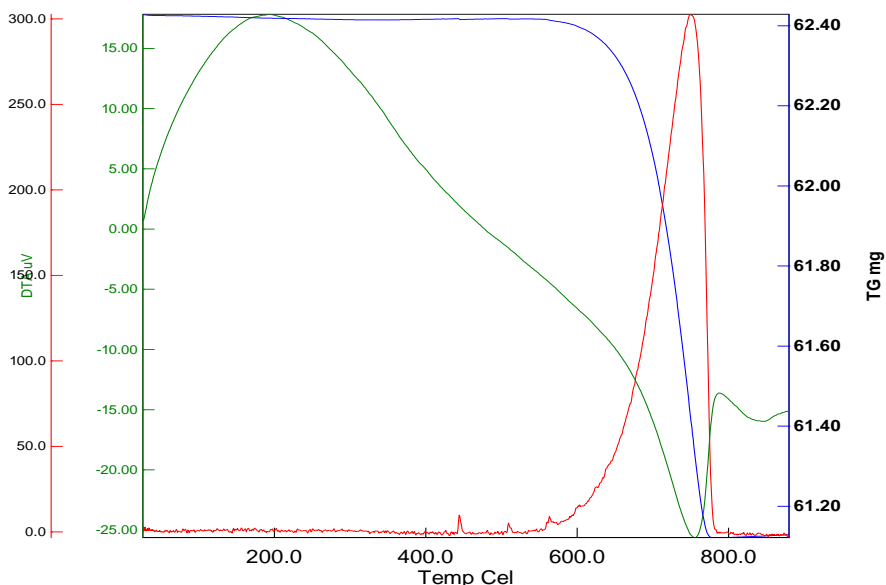


**Слика 15.** Шематски приказ на термогравиметриска анализа

Материјалот кој се испитува се меле во порцелански аван до прашкаста состојба. Се зема околу  $0,5 - 1\text{ g}$ , и се префрла во специјален тигел од платина или електротопен корунд, кој со платинска жица е поврзан за едниот крак на аналитичката вага. Потоа тигелот се внесува во печката каде најчесто се загрева со брзина од  $5$  до  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Температурата на испитуваниот примерок се мери со термопар кој е поставен директно во тигелот, а вагата ја регистрира секоја промена на масата.

TGA најчесто се користи за идентификација и квантитативна анализа на карбонатни и глинени сировини. Секоја промена на маса е проследена и со соодветна енергетска промена, додека, пак, при секоја енергетска промена не мора да дојде и до промена на маса.

Со термогравиметриската анализа не се регистрираат енергетските промени при кои доаѓа до фазна трансформација, бидејќи не доаѓа до промена на маса. Меѓутоа, овие промени се регистрираат со диференцијално термичката анализа која има поширок опсег на примена. Најчесто овие две методи, диференцијално термичката анализа и термогравиметриската анализа (DTA-TG), се применуваат заедно како комплементарни методи за да се добијат попрецизни податоци. Доколку на DTA кривата има пик кој не е проследен со промена на масата на TGA кривата, станува збор за фазна трансформација. На слика 16 како пример се презентирани DTA и TGA криви на сировина калцит.



**Слика 16.** DTA и TGA криви на природен калцитски мермер

На TGA кривата при температура од околу 660 °C се регистрира почеток загуба на маса поради термичката декомпозиција на  $\text{CaCO}_3$ . Истовремено (поради термичката декомпозиција) и на DTA кривата се манифестира пик. Малите пикови на DTA кривата во интервалот од 450 до 600 °C се со минорно значење, а потекнуваат од површинските примеси на испитуваната природна сировина.

Наведените постапки за DTA и TGA се суштински и базични, но во современите инструменти тие се автоматизирани. Кај нив постапката се сведува на поставување на пробата и избор на аналитичките параметри.

## 2.5. ФИЗИЧКО-МЕХАНИЧКИ ИСПИТУВАЊА

При детална карактеризација на суровината, потребно е да се детерминираат и некои од основните физичко-механички параметри, како:

- волуменска маса,
- насипна маса,
- специфична маса,
- порозност,
- јачина на притисок и други.

### Волуменска маса ( $\gamma_B$ )

Волуменска маса претставува маса на единица волумен од материјалот (компакт) со затворени пори. Волуменот на материјалот најчесто се определува индиректно преку волуменот на истисната течност од заситен со вода компакт (пробно тело). Мерењето се врши во градуирани мерни садови кои овозможуваат различна точност при отчитувањето на зголеменото ниво на вода (или друга течност). Волуменската маса на материјалот се пресметува според формулата:

$$\gamma_B = \frac{m_0}{V}, (g/cm^3)$$

каде е:

$m_0$  – маса на материјалот (компакт) во сува состојба, (g);

$V$  – волумен на компакт (волумен на истисната течност), ( $cm^3$ ).

### Насипна маса ( $\gamma_H$ )

Насипна маса претставува маса на материјалот која се содржи во одреден волумен во слободна форма, а притоа да биде со познат гранулометриски состав. Нејзиното определување е важно за точно дефинирање на транспортот на суровините. Насипната маса на материјалот се определува така што мензура, или некој друг сад со точно определен волумен, се полни со испитуваниот материјал, лесно се протресува и се мери масата ( $m$ ). Исто така, се забележува и волуменот кој го зафаќа материјалот во мензурата ( $V$ ). Измерената маса во соодветниот волумен ја дава вредноста на насипната маса:

$$\gamma_H = \frac{m}{V}, (g/cm^3)$$



**Слика 17.** Определување насипна маса

Вака измерената насипна маса одговара на растресита состојба, за разлика од збиена состојба на материјалот. За таа цел, садот со материјалот се поставува на вибратор и постојано се дополнува сè до неговото максимално слегнување (набивање). Суштествено е тоа што со ова мерење покрај специфичната маса влијание имаат и празните места меѓу честичките, што е условено од нивната форма, големина и гранулометриски состав. Насипната маса, како податок, најчесто се користи за одредување на волуменот на транспортните средства во комбинација со нивната носивост.

### **Специфична маса ( $\gamma$ )**

Специфична маса претставува маса на единица волумен од материјалот без отворени и затворени пори. Таа може да се определи со помош на повеќе различни методи. Една од методите е и определување на специфична маса со помош на пикнометар. Методата се базира врз определување разлика помеѓу маси на позната течност (најчесто вода) и испитуваната материја. Доколку испитуваниот материјал стапува во реакција со водата, се користи друга течност, а специфичната маса се пресметува со множење на специфичната маса добиена по претходната формула со специфичната маса на користената течност.

Пикнометарот е стаклен сад со точно дефиниран волумен. Се затвора со чеп низ чија средина се наоѓа капилара. Волуменот е точно определен кога капиларата е наполно исполнета со течноста која се користи како медиум.



**Слика 18.** Пикнометар

Начин на мерење:

- Се мери празен сув пикнометар –  $m_{\pi}$ ;
- Пикнометарот се полни околу 1/4 од волуменот со материјалот кој се испитува (претходно исушен и измелен) и се мери –  $m_{\pi+M}$ ;
- Пикнометарот со материјал се дополнува до приближно 2/3 од волуменот со дестилирана вода. Лесно се протресува и се вакуумира во ексикатор со цел да се извлечат меурчињата воздух кои се задржани меѓу честичките од испитуваниот материјал. Потоа се дополнува со дестилирана вода, се брише со сува крпа и се мери –  $m_{\pi+M+B}$ ;
- По мерењето, се исфрла материјалот од пикнометарот, се мие, се полни со дестилирана вода и се мери –  $m_{\pi+B}$ ;
- Се пресметува масата на материјалот:  $m_M = (m_{\pi+M} - m_{\pi})$ .

Специфичната маса на материјалот (суровината) се пресметува по формулата:

$$\gamma_C = \frac{m_M}{m_{\pi+B} + m_M - m_{\pi+M+B}}, \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Степен на густина се дефинира како однос помеѓу специфичната и волуменската маса на материјалот.

## Порозност ( $\varphi$ )

Порозноста е структурна карактеристика која ја одразува компактоста на материјалот (суровината). Порите претставуваат одредени шуплини во структурата на материјалот. Доколку порите се поврзани помеѓу себе и со надворешната атмосфера, тогаш порозноста е отворена, а затворена порозност постои доколку порите се изолирани помеѓу себе. Според димензијата, разликуваме микро, мезо и макропори. Порозноста и карактеристиките на самите пори (големина, дистрибуција, поврзаност) влијаат врз основните физичко-механички својства на материјалот, како: јачина на притисок, водовпивање, топлоспроводливост и други. Генерално, колку порозноста на материјалот е повисока, јачината на притисок е помала, а термоизолационите особини се подобри.

Кај материјалите се одредува вкупна, отворена и затворена порозност. Вкупната порозност се дефинира како однос помеѓу волуменот на порите ( $V_{\Pi}$ ) и волуменот на пробното тело ( $V$ ):

$$\varphi_{\text{ВК.}} = \frac{V_{\Pi}}{V} \cdot 100 = \frac{Y - Y_B}{\gamma} \cdot 100, (\%)$$

каде е:

$\gamma$  – специфична маса, ( $g/cm^3$ );

$Y_B$  – волуменска маса, ( $g/cm^3$ ).

Отворена порозност претставува однос помеѓу волуменот на отворените пори и вкупниот волумен на пробното тело, изразен во проценти. Бидејќи волуменот на отворените пори може да се изрази со разликата ( $G_1 - G_0$ ), а волуменот на пробното тело со разликата ( $G_1 - G_2$ ), отворениот порозитет може да се пресмета според изразот:

$$\varphi_{\text{От.}} = \frac{G_1 - G_0}{G_1 - G_2} \cdot 100, (\%)$$

каде е:

$G_0$  – маса на суво пробно тело, ( $g$ );

$G_1$  – маса на суво пробно тело заситено со вода, ( $g$ );

$G_2$  – маса на суво пробно тело (заситено со вода) во вода, ( $g$ ).

Затворена порозност претставува однос помеѓу волуменот на затворените пори и волуменот на пробното тело, изразен во проценти. Таа се пресметува како разлика помеѓу вкупната и отворената порозност.

$$\varphi_{\text{Зат.}} = \varphi_{\text{ВК.}} - \varphi_{\text{От.}}, (\%)$$



### Јачина на притисок

Јачината на притисок е важен параметар за процесот на механичка обработка на материјалот. Таа претставува максимален притисок (сила на единица површина) под чие што оптоварување материјалот се раздробува. Се пресметува од изразот:

$$f = \frac{F}{A}$$

каде е:

$f$  – јачина на притисок ( $MPa$ );

$F$  – сила што дејствува во моментот на раздробување, ( $N$ );

$A$  – површина на пробното тело под оптоварување, ( $cm^2$ ).

Јакоста на материјалот се определува на хидраулична преса.



**Слика 19.** Хидраулична преса

Како пробни тела најчесто се користат коцки со стандардни димензии 40 x 40 x 40 mm, со потполно рамни и паралелни површини за да се добијат точни и репродуктивни резултати.



**Слика 20.** Пробно тело и раздробено пробно тело

## 2.6. ГРАНУЛОМЕТРИСКА АНАЛИЗА

Од голема важност за примената на минералните суровини во хемиско-технолошките процеси е гранулометрискиот состав, односно големината (димензијата) на минералните зрна и нивниот сооднос. Од гранулометрискиот состав може да се увидат ефектите од процесот на отворање на суровината и да се определи степенот на уситнување. Гранулометрискиот состав на минералната суровина може да се определи со примена на неколку методи: ситова анализа, седиментациона анализа, ласерска анализа, микроскопска метода и други.

### Ситова анализа

Самиот збор ситова укажува на тоа дека анализата се изведува со помош на сита. Притоа материјалот се пропушта да помине низ комплет сита со стандардни димензии на отворите. Ситата се така поставени што најгоре се наоѓа најкрупното сито (со најголеми отвори), а најдолу е поставено најситното сито (со најмали отвори). Односно, од горе спрема долу отворите на ситата систематски се намалуваат. Целта е на ситото да се задржат зрната со димензија поголема од отворите, односно да поминат зрната со помала димензија. Со ситовата анализа тешко е егзактно да се определи димензијата на зрната, бидејќи најчесто тие имаат неправилна (недефинирана) форма. По процесот на отворање, измелениот материјал може да се разгледува како полидисперзен систем со различна големина на зрна. За дефинирање на обликот на зрната се користи односот на нивните димензии. Затоа таа договорно се определува со димензии на паралелопипед во кој таквото зрно може да се смести. За жал, во пракса е невозможно технички за сите зрна да се врши такво димензионално определување, па затоа, заради упростување на постапката, сите зрна се карактеризираат со една договорна димензија ( $d$ ), која се нарекува дијаметар на зрно.

Таа димензија е определена со големината на најмалиот квадратен отвор низ кој таквото зрно може да помине. Нормално, оваа димензија дава определена грешка (на пример, елипсоидно зрно хоризонтално не може да помине низ квадратен отвор, но ако е поставено вертикално, може), но тоа договорно се толерира. Група на зрна кои поминуваат низ некој определен квадратен отвор на сито со определен дијаметар ( $d$ ) се дефинира како класа ( $- d$ ), а зрната кои ќе останат на ситото се нарекуваат класа ( $+ d$ ). Во секоја таква

класа се содржат зрна кои имаат различна големина која е во рамки на големина помеѓу определените големини на  $(- d + d)$ . За таа цел се користат стандардизирани сита, при што се користи скала на геометриска прогресија од квадратен корен од два. Истовремено се користат и фактори од четврти корен од два и десетти корен од два. Таквите сита и нивната трансформација од основен стандард во поголеми или помали вредности се стандардизирани со државни или меѓународни стандарди, како што се: DIN (германски), ГОСТ (руски), BS (британски), и Tyler (американски). Кај нас доминантно се применуваат стандардите на Tyler (претежно во рударство и металургија, во англосаксонски мерки) и DIN (претежно во хемиската индустрија). Главна карактеристика на сите такви стандарди е дека постои едно основно сито со прецизно дефинирана големина на квадратниот отвор.

Ситовата анализа, која претставува сеене на материјал низ сита со различна големина на отвори, може да се врши на два начина: сува ситова анализа и мокра ситова анализа.

Сувата ситова анализа се применува на релативно покрупни растресити материјали, а мократа за фино зрнести материјали (на пример, глини). Материјалот се пропушта (просејува) низ одбрана серија (комплет) од сита. Притоа просејувањето може да биде рачно или со помош на механички вибрационен уред. Класите кои се задржале на секое од ситата се мерат, при што сумата од сите класи мора да биде еднаква на вкупната влезна маса.

Класите се собираат во саатни стакла, се сушат, се мерат, се пакуваат и се обележуваат, а уделот се изразува во проценти.

Пример:

|                        |     |
|------------------------|-----|
| + 2 mm .....           | A % |
| - 2 mm + 1 mm .....    | B % |
| - 1 mm + 0,5 mm .....  | B % |
| - 0,5 mm + 0,1 mm .... | Г % |
| - 0,1 mm .....         | Д % |

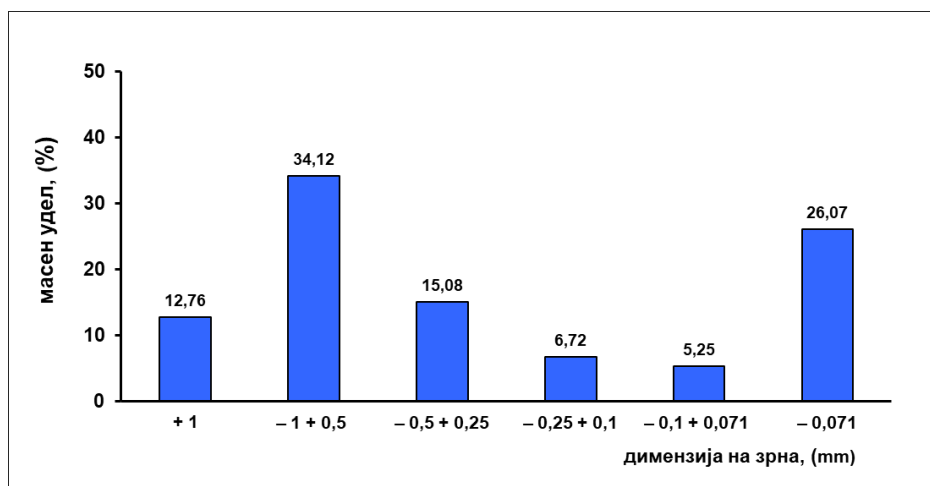
ВКУПНО = 100 %

Гранулометрискиот состав на материјалот може да биде презентирани на различни начини. Најчесто гранулометрискиот состав на материјалот се изразува табеларно. Односно, се прикажува уделот (изразен во проценти) на соодветната дименциона фракција. Табеларно може да биде презентирани и кумулативниот состав.

**Табела 1.** Гранулометриски состав

| Димензиона фракција на зрна | Масен удел (%) |
|-----------------------------|----------------|
| + 1 mm                      | 12,76          |
| - 1 mm + 0,5 mm             | 34,12          |
| - 0,5 mm + 0,25 mm          | 15,08          |
| - 0,25 mm + 0,1 mm          | 6,72           |
| - 0,1 mm + 0,071 mm         | 5,25           |
| - 0,071 mm                  | 26,07          |
| ВКУПНО                      | 100,00         |

Гранулометрискиот состав на материјалот може да биде презентирани и во форма на хистограм.

**Слика 21.** Гранулометриски состав презентирани со хистограм

Гранулометрискиот состав на материјалот може да биде презентирани и преку директната крива. Притоа на апцисата се нанесуваат отворите на ситото, а на ординатата се масените удели на соодветните фракции изразени во проценти. Во пракса често пати се користи и кумулативен приказ на гранулометрискиот состав на материјалот.

Не постои единствена равенка за изразување дистрибуција на честички по големина. Најчесто се применуваат аналитички функции како логаритамски дистрибутивен закон, Гаусов дистрибутивен закон и други. Од експерименталните податоци е докажано дека за поголем број материјали дистрибуцијата на честичките добро ја следи равенката на Росин-Рамлер. Интегралниот облик на оваа равенка е следниот:

$$P(x) = \exp \left[ - \left( \frac{x}{x_0} \right)^n \right]$$

каде е:

$x$  – големина на честички;

$P(x)$  – содржина на честички поголеми од  $x$ ;

$x_0, n$  – параметри на дистрибуција на честичките.

Овие параметри се определуваат од линеарниот облик на равенката:

$$\ln \left[ \ln \left( \frac{1}{P(x)} \right) \right] = n \cdot \ln x - n \cdot \ln x_0$$

Просечната големина е таква величина која најдобро ја претставува дистрибуцијата на честичките. За претставување на дистрибуцијата на честичките покрај просечната големина, потребни се и други параметри. Најчесто применувана просечна големина е  $x_{median}$  со која се изразува големината на честичките кои учествуваат со 50 % во кумулативниот состав. Карактеристична големина е и  $x_{mod}$  која претставува големина на честички што одговара на максимумот при диференцијалната крива на дистрибуција.

Карактеристичната големина на честичките се одредува зависно од нивната примена. Како најчесто користени големини на честички се: дијаметар дефиниран со волумен, дијаметар дефиниран со површина, ситов дијаметар, и други.

Што се однесува до точноста на ситовата анализа, треба да се укаже дека и кај неа како и кај сите анализи постојат усвоени грешки кои се толерираат. Овде, сомневањето во резултатите може да потекнува од три причини: неразбивање на агломерирани зрна, несоодветно поставување на зрната по хоризонтала или вертикала, како и можноста да се рашират отворите на ситото по долготрајна и груба употреба.

## Лабораториска вежба

Материјалот примарно се суши во сушара на температура од 105 °C. Потоа се мери 50 g од материјалот и се разматува со вода и неколку капки амонијак (електролитско влијание за да се раздвојат зрната и да се спречи нивна понатамошна агрегација), се затоплува, и по ладењето се пропушта низ комплетот сита со слаб млаз вода, како средство за плакнење. Се користат сита со димензија на отворите: 1 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,1mm и 0,071 mm. Ситата се така поставени што најгоре се наоѓа најкрупното сито, а најдолу е поставено најситното сито. Постапката трае сè до избистрување на исцедената вода.



**Слика 22.** Стандардни сита подредени за мокра ситова анализа

Материјалот кој се задржал на ситата се префрла на саатно стакло, кое потоа се носи во сушара на температура од 105 °C. На крај, класите зрна се мерат, се пакуваат и соодветно се обележуваат. Резултатите од мократа ситова анализа треба да бидат презентирани табеларно и во форма на хистограми. Различните димензиони фракции на зрна да се погледнат под бинокуларен микроскоп и соодветно да се опишат.



**Слика 23.** Саатни стакла во сушара

### Седиментациона (Андреасенова) анализа

За определување на гранулометрискиот состав на изразено ситнозрнести материјали се користи седиментациона анализа која се изведува на два начина: со помош на Андреасенов апарат или со седиментациона вага. За овие анализи е применет Стоксовиот закон за таложење на сферични честички, при ламинарен режим со  $Re = 0,20$ . Во такви услови, брзината на честичките е следната:

$$v = \frac{2 \cdot r^2 \cdot (\gamma_M - \gamma_T) \cdot g}{9 \cdot \mu}$$

каде е:

$v$  – брзина на таложење, (cm/s);

$r$  – полупречник на зрната, (cm);

$\gamma_M$  – специфична маса на испитуваниот материјал, (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_T$  – специфична маса на течната фаза, (g/cm<sup>3</sup>);

$g$  – земјино забрзување, (cm/s<sup>2</sup>);

$\mu$  – вискозитет на течната фаза, (g/cm).

Времето на таложење се пресметува од изразот:

$$t = \frac{s}{v}$$

каде е:

$t$  – време на таложење, (s);

$s$  – поминат пат, (cm);

$v$  – брзина на таложење, (cm/s).

Апаратот се состои од градуиран стаклен цилиндар со волумен од околу 500 – 600 cm<sup>3</sup>. На горниот дел е поставена пипета со резервоарче од 10 cm<sup>3</sup>. Долниот дел на пипетата е поставен на нултата црта од цилиндарот. Со отворање на двојната славина се вшмукува од суспензијата и се полни резервоарчето. Со вртење на двокраката славина во спротивна положба се испушта во претходно измерено лонче. Лончето се суши на температура од 105 °C и се мери. Разликата во масата претставува количество на цврст материјал во дадениот волумен од суспензијата, со дијаметар на зрна кои за определено време поминале соодветен пат.

## Лабораториска вежба

За анализа се земаат 2,00 g од испитуваниот материјал, се ставаат во чаша со 300 – 400 ml вода, се додаваат 2 – 3 капки  $\text{NH}_4\text{OH}$  и по тивко вриење од околу 30 минути, и оладување, се просејува низ сито од 0,063 mm. Остатокот на ситото се суши и се мери, а поминатиот материјал целосно се префрла во Андреасенов апарат. Потоа апаратот се дополнува со дестилирана вода до марката, добро се размешува и се остава да стои на рамна подлога, без вибрации. Ако пробата се земе во времето кога суспензијата во апаратот е максимално проматена, се нарекува нулта проба (земена во нулто време). Нејзина карактеристика е што ги содржи честичките со сите димензии, во сооднос едни спрема други, како и во оригиналната проба. Како одминува времето, честичките постепено се таложат во Андреасеновиот апарат (прво покрупните па поситните), што значи во различно време честички со одредена димензија ќе преовладуваат во просторот каде што се вшмукува пробата.



**Слика 24.** Андреасенов апарат

Според времето на таложување (земање проба), може да се пресмета кој дијаметар е карактеристичен за честичките кои се нашле во просторот од каде што се зема пробата, или како што практично се работи во процесот на мерење, се оди обратно. Поточно, за зададен дијаметар на честички се пресметува времето на таложување и во тоа време се зема проба, што значи дека во таа проба ќе преовладуваат честичките со тој дијаметар. Постапката се повторува толку пати колку што има зададени дијаметри на честичките. Измерените проби се претставуваат како проценти од нултата проба, во форма на гранулометриска крива или табеларно.



## 2.7. ХЕМИСКА АНАЛИЗА

За определување на хемискиот состав на суровините се применува хемиска анализа, при што се дефинира уделот на присутните елементи во оксидна форма. Класичната хемиска силикатна анализа претставува комплексна метода во која покрај стандардните видови на хемиски анализи се имплементирани и одредени специфични постапки. Притоа, хемискиот состав се определува од растворена состојба на испитуваниот материјал. Бидејќи неметалните суровини претставуваат цврст материјал, кој најчесто е и нерастворлив во вода или минерални киселини, се наметнува потребата од негово преведување во раствор. Затоа се применува постапка на топење со алкални карбонати, кои се додаваат за да ја намалат температурата на топење.

Сумата на компонентите во хемиската анализа изнесува 100 %. Во неа влегуваат сите определувани елементи (во вид на оксиди и др.), како и загубата при жарење. Притоа содржината на  $\text{SiO}_2$  и  $\text{SO}_3$  се определува гравиметриски, а содржината на  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  се определува комплексометриски при титрација со Комплексон III (EDTA) по стандардни постапки. Бидејќи топењето се изведува во присуство на алкални карбонати, содржината на  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  се определува со посебна постапка на пламен фотометар. Силикатните суровини во својот состав содржат и испарливи (согорливи) компоненти, како што се: хидроксилна вода,  $\text{CO}_2$ , органски примеси и други. Нивната маса, односно процентната застапеност во пробата се определува како загуба на маса при жарење на пробата во печка, на температура од  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  за време од 1 час. Влагата како променлива големина не влегува во сумата од 100 %. Затоа пробата примарно треба да се исуши во сушара на температура од  $105\text{ }^\circ\text{C}$  до константна маса.

### Лабораториска вежба

Од претходно издробениот и измелен (со процесите на отворање на суровината) материјал се зема средна проба за класична хемиска силикатна анализа со алкално топење. Земената средна проба дополнително се меле во порцелански аван до гранулација од околу  $60\text{ }\mu\text{m}$  (се проверува на тој начин што не треба да се чувствуваат зрна меѓу прсти).

За определување на содржината на влага во суровината (таа не влегува во хемиската анализа) околу 5 g од пробата се префрлаат во стаклен вегеглас. На аналитичка вага се мери точното количество на проба. Таа потоа се суши во сушара на температура од 105 °C до константна маса. Разликата во маса ја дава содржината на влага во суровината.

За топење, од исушената проба се одмерува на аналитичка вага приближно околу еден грам (внимание: масата мора да е точно определена на четири децимали). Измерената количина од пробата се става во платинско лонче (најчесто мерењето се врши директно во платинско лонче), се додава приближно 5 g карбонатна смеса ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и  $\text{K}_2\text{CO}_3$  во однос 1:1) и добро се промешува со платинска игла. На крај се додава уште еден слој од карбонатната смеса над пробата. Лончето се покрива со платински капак (се остава мал простор за визуелна контрола) и се загрева на бренер. Најчесто се користат два бренера, во почетокот се загрева горниот дел од лончето, а подоцна се загрева и долниот дел на лончето (слика 25).



**Слика 25.** Топење на пробата за анализа

Во почетокот на затопувањето на смесата почнува да се ослободува  $\text{CO}_2$  од карбонатите, што доведува до силно пенење (вриење) на пробата. Поради тоа треба да се внимава да не истече пробата од лончето. Лончето треба да остане на бренер сè до потполно избистрување на стопилката, што претставува период на стабилизација. По стабилизирањето, платинското лонче се остава да се олади, при што стопилката се стврднува.

Во процесот на топење, во присуство на вишок од карбонати, се образуваат алкални силикати, алуминати, ферити и други соединенија кои се релативно лесно растворливи во минерални киселини. Лесната растворливост е поради тоа што стопилката брзо се лади и нема време за формирање кристална решетка од новосоздадените соединенија. Тие остануваат во аморфна состојба, која овозможува брзо растворање во киселина.

Платинското лонче со стврднатата стопилка се става во легната положба во порцеланската здела. Во зделата се додава приближно  $100 \text{ cm}^3$  врела дестилирана вода и околу  $5 - 10 \text{ cm}^3$  концентрирана  $\text{HCl}$ . Во такви услови почнува процесот на растворање на материјалот, кое често е проследено и со интензивно пенење, поради што се поклопува со саатно стакло за да не испрска пробата надвор од зделата.

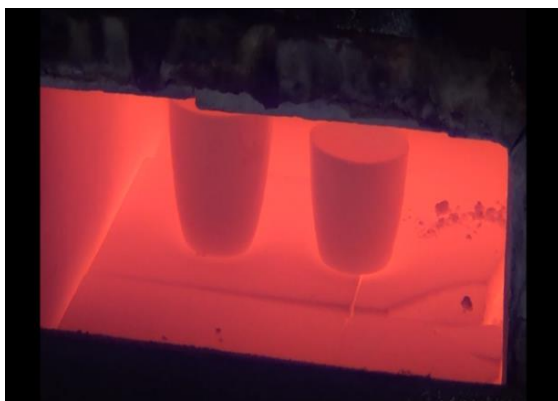
Кога пробата ќе биде потполно растворена, лончето се плакне со дестилирана вода. Потоа зделата се поставува на водена бања на температура од  $60$  до  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Хемискиот процес кој се одвива во такви услови (слика 26) е следниот: растворениот  $\text{SiO}_2$  во форма силициумова киселина преминува во хидрогел (бел волуминозен талог), а помал дел останува во колоидна состојба (хидрозол) или во молекуларна растворена состојба. Во фазата на загревање, растворениот  $\text{SiO}_2$  преминува во хидрозол, а тој, пак, преминува во нерастворена состојба за време на испарувањето. Испарувањето се врши сè до потполно исушување и стабилизирање на  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ . За спречување на хидролиза повторно се додава  $5 - 10 \text{ cm}^3$  концентрирана  $\text{HCl}$  и повторно се испарува до потполно сушење. По ова и трет пат се додава приближно околу  $5 \text{ cm}^3$   $\text{HCl}$  и врела вода.



**Слика 26.** Создавање  $\text{SiO}_2$  хидрогел

На крај, содржината од зделата се филтрира низ среден филтер. Промивањето на зделата и талогот се врши со врела дестилирана вода сè до негативна реакција на хлорни јони. По оваа

фаза на филтерот е задржан хидрогелот, а во растворот (филтратот) се содржани оние компоненти кои во облик на оксиди се определуваат квантитативно со комплексометриска анализа ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$ ). Хидрогелот со филтерната хартија се става во претходно исушено и измерено порцеланско лонче и се жари во печка (слика 27), 1 час, на температура од  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , се лади во ексикатор, и повторно се мери. Разликата во масата претставува маса на  $\text{SiO}_2$  (ослободен од водата).



**Слика 27.** Жарење порцеланско лонче во печка

Содржината на  $\text{SiO}_2$  изразена во проценти се определува од изразот:

$$\% \text{SiO}_2 = \frac{m_2 - m_1}{m} \cdot 100$$

каде е:

$m$  – маса на измерената проба;

$m_1$  – маса на празно лонче пред жарење;

$m_2$  – маса на лончето со  $\text{SiO}_2$  (по жарење).

Од претходно добиениот филтрат, кој се префрла во колба од  $500\text{ cm}^3$  и се дополнува со дестилирана вода до марката, се определува содржината на железо, алуминиум, калциум, магнезиум (во вид на оксиди),  $\text{SO}_3$ , (ако е потребно и некои други оксиди). Комплексометриското определување на металните оксиди се изведува со Комплексон III по стандардни постапки. Едни од рецептурите за комплексометриско определување за  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  се следните:

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:**

- се отпипетируваат 25 cm<sup>3</sup> од филтратот;
- се додава бромфенол сино 2 – 3 капки;
- со NH<sub>4</sub>OH се нагодува  $pH \approx 3,6$ ;
- се додаваат 20 cm<sup>3</sup> HCl (0,1 mol/dm<sup>3</sup>);
- се додаваат 15 cm<sup>3</sup> тампон (пуфер  $pH \approx 1,5$ );
- се додаваат неколку капки салицилна киселина (зависно од интензитетот на обојувањето, максимум 20 капки);
- се загрева на температура до околу 40 – 50 °C;
- се титрира со Комплексон III до светложолта боја и се запишуваат потрошените cm<sup>3</sup>;
- се продолжува со истата проба за определување на Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

$$\% Fe_2O_3 = \frac{cm^3 (EDTA) \cdot F_{EDTA} \cdot F_{Fe_2O_3} \cdot 2}{m \text{ (одвага)}}, \quad F_{Fe_2O_3} = 2,857$$

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:**

- во пробата во која претходно било определено количеството на Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> се продолжува по следната постапка;
- се додава амониум ацетат (CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>) до синкаво обојување;
- се додаваат 5 cm<sup>3</sup> CH<sub>3</sub>COOH;
- се додаваат 2 – 3 капки бакар комплексон;
- се додаваат 5 – 10 капки PAN индикатор;
- се загрева до вриење и се титрира со Комплексон III до губење на црвената боја;
- повторно се загрева до вриење (се повторува бидејќи црвената боја е повратна) и повторно се титрира сè до конечно губење на црвената боја (се запишуваат потрошените cm<sup>3</sup>).

$$\% Al_2O_3 = \frac{cm^3 (EDTA) \cdot F_{EDTA} \cdot F_{Al_2O_3} \cdot 2}{m \text{ (одвага)}}, \quad F_{Al_2O_3} = 1,821$$

**CaO:**

- се отпипетируваат 25 cm<sup>3</sup> од филтратот (50 cm<sup>3</sup> за помала концентрација на CaO);
- се додаваат 200 cm<sup>3</sup> дестилирана вода;
- се додаваат 10 cm<sup>3</sup> PVA (поливинил алкохол) или 20 cm<sup>3</sup> доколку уделот на MgO е повисок од 2 %;
- се регулира  $pH \approx 7$  со амонијак (капка по капка);
- се додаваат 7 cm<sup>3</sup> ТЕА (триетанол амин 33 %);
- се додаваат 10 cm<sup>3</sup> NaOH ( $pH \approx 12,5 - 13$ );
- се додава индикатор калцеин (во прав);
- се титрира со Комплексон III до розова боја (до губење на карактеристичната зеленикава флуоросценција за калцеин) и се запишуваат потрошените cm<sup>3</sup>.

$$\% \text{ CaO} = \frac{\text{cm}^3 (\text{EDTA}) \cdot F_{\text{EDTA}} \cdot F_{\text{CaO}} \cdot 2}{m (\text{одвага})}, \quad F_{\text{CaO}} = 2,000$$

**MgO:**

- се отпипетируваат 25 cm<sup>3</sup> од филтратот;
- се регулира  $pH \approx 7$  со амонијак (капка по капка);
- се додаваат 30 cm<sup>3</sup> ТЕА (триетанол амин 33 %);
- се додаваат потрошените cm<sup>3</sup> од Комплексон III (потрошени при титрација на CaO);
- се додаваат 10 cm<sup>3</sup> амонијак до  $pH \approx 10 - 11$ ;
- се додаваат неколку капки индикатор за MgO (слаба виолетова боја);
- се титрира со Комплексон III до обезбојување и се запишуваат потрошените cm<sup>3</sup>.

$$\% \text{ MgO} = \frac{\text{cm}^3 (\text{EDTA}) \cdot F_{\text{EDTA}} \cdot F_{\text{MgO}} \cdot 2}{m (\text{одвага})}, \quad F_{\text{MgO}} = 1,440$$

Изразите за пресметка се однесуваат за земени 25 cm<sup>3</sup> проба за комплексометриско определување од вкупните 500 cm<sup>3</sup> филтрат.

Од филтратот за комплексометрија, исто така, се определуваат и сулфати. Се отпипетируваат 100 cm<sup>3</sup> во чаша. Растворот треба да биде слабо кисел што се проверува со капнување на 2 – 3 капки индикатор метил оранж (растворот треба да добие слабо црвеникава боја), и потоа се загрева до вриење. Во загреаниот раствор се додава 10 – 15 cm<sup>3</sup> врел раствор на 10 % BaCl<sub>2</sub>. При присуство на сулфати се создава бел талог од BaSO<sub>4</sub>. Кога талогот ќе падне на дното (по 24 часа), се филтрира низ густ филтер и се промива со врела вода сè до негативна реакција на хлорни јони. Промиениот талог со филтерната хартија се суши, се спалува, се жари на температура од 800 °C (1 час), се лади во ексикатор и се мери. Количеството сулфати, изразено како SO<sub>3</sub>, се пресметува по формулата:

$$\% SO_3 = \frac{m_1 \cdot 0,343}{m} \cdot 100$$

каде е:

$m$  – маса на земената проба за анализа;

$m_1$  – маса на талогот од BaSO<sub>4</sub>;

0,343 – фактор за претворба на BaSO<sub>4</sub> во SO<sub>3</sub>.

За да се определи загубата при жарење, од пробата се измерува приближно околу еден грам (на аналитичка вага со прецизност од 4 децимали) во порцеланско лонче. Пробата се загрева во печка на 1000 °C и се задржува на таа температура 1 час. Потоа се лади во ексикатор до собна температура и се мери. Загубата при жарење се пресметува при следната формула:

$$\% \text{з.ж} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100$$

каде е:

$m_1$  – маса на проба пред жарење;

$m_2$  – маса на проба по жарење.

За определување на уделот на Na<sub>2</sub>O и K<sub>2</sub>O се мерат точно 0,5000 g во платинска здела. Пробата се навлажнува со неколку капки дестилирана вода, се додаваат околу 4 – 5 капки концентрирана H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, а потоа околу 8 – 10 cm<sup>3</sup> HF. Зделата се поставува на водена бања и се испарува сè додека не престане

одвојувањето на бели пари од  $\text{SiF}_4$ . Постапката се повторува, за посигурно и поцелосно одвивање на реакцијата. Таа реакција е комплексна, но во суштина се сведува на разложување на силикатите под дејство на  $\text{HF}$ , при што присутниот  $\text{SiO}_2$  во вид на  $\text{SiF}_4$  испарува. Со издвојување на  $\text{SiO}_2$  од кристалната решетка на силикатот таа се растура, така што присутните алкални елементи стануваат растворливи во вода. Постапката продолжува со додавање врела дестилирана вода на сувиот талог во платинската здела, па се додаваат уште околу  $5 \text{ cm}^3$  концентрирана  $\text{HCl}$  и се филтрира низ среден филтер. На филтерот останува нерастворениот остаток, кој за оваа цел не ни е потребен, а од филтратот се определува количеството на натриум и калиум (во вид на оксиди  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ ) на пламен фотометар на следниот начин.

Пламениот фотометар (слика 28) претходно се баждари со стандардни раствори на  $\text{KCl}$  и  $\text{NaCl}$  кои пресметковно се однесуваат на  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  (скала поставена на 100) и дестилирана вода (поставена на 0). Од подготвениот филтрат, фотометарот континуирано вшмукува, и преку диза го вбригува растворот во пламенот од пропан-бутан гас или ацетилен. Притоа, пламенот карактеристично се обојува од присутните метални јони. Обоениот пламен, со комплексен состав по бранови должини, поминува низ филтер (монохроматор) кој ја пропушта само светлината со точно определена бранова должина, која е карактеристична за натриумовиот или калиумовиот јон. На пропуштената светлина ѝ се мери интензитетот на обојување со помош на фотокелија и се регистрира на скалата во интервалот од 0 до 100. Притоа интензитетот на обојувањето е директно зависен од концентрацијата. За отчитаната вредност на скалата од пламен фотометарот за дадената проба, се отчитува процентот на содржината на  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  од стандардни баждарени криви, добиени со користење раствори со познати концентрации.



**Слика 28.** Пламен фотометар тип Evans Electroselenium Ltd.

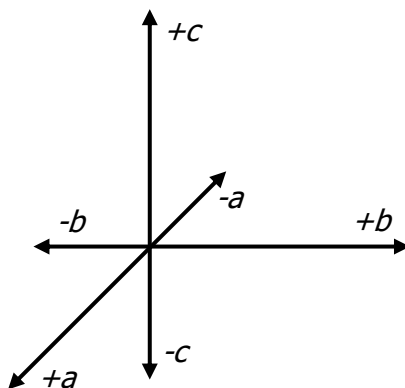


## 2.8. КРИСТАЛОГРАФИЈА

Зборот кристал доаѓа од грчкиот збор кристалос, што значи мраз. Под кристална структура се подразбира правилен распоред на атомите, атомските групи, јоните или молекулите во просторот. Кристалната структура се претставува преку идеализирани геометриски полиедри. Атомите, односно јоните симболично се претставуваат со кругови (топки), а со линиите кои ги поврзуваат формираат полиедри кои ја симболизираат кристалната решетка.

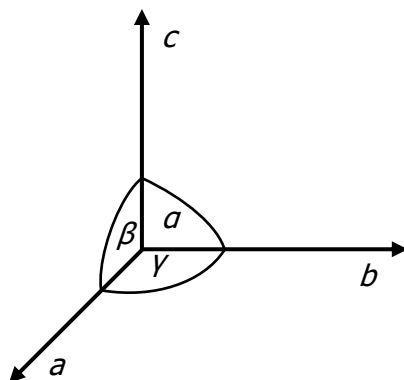
Кај кристалите точно е определена положбата на секој атом во просторот. Најмалиот единечен простор во кој се застапени сите основни елементи на кристалот, и кој закономерно се повторува во сите просторни правци, се нарекува елементарна ќелија. Елементарната ќелија се дефинира преку должината на трите рабови  $a$ ,  $b$  и  $c$ , и аглиите помеѓу нив  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ .

За да се дефинира положбата на елементите на кристалната ќелија во просторот, се користат кристалографските оски (слика 29), кои по број се три, со исклучок на хексагоналниот кристален систем (каде се четири). Едната оска е вертикална и се означува со  $c$ . Над центарот е позитивниот дел, а под центарот е негативниот дел. Оската  $b$  е поставена во иста рамнина со оската  $c$ , притоа позитивна е во десниот, а негативна е во левиот дел. Третата кристалографска оска се нарекува  $a$ .



**Слика 29.** Кристалографски оски

Аголот  $\alpha$  е помеѓу оските  $b$  и  $c$ , аголот  $\beta$  го создаваат оските  $a$  и  $c$ , додека, пак, аголот  $\gamma$  го создаваат оските  $a$  и  $b$  (слика 30).



**Слика 30.** Кристалографски агли

Основните елементи на елементарната кристална ќелија се кристалографските рамнини, рабови и темиња. Кристалографските рамнини претставуваат рамни површини кои го ограничуваат кристалот во просторот. Кристалографските рабови се добиваат при пресек на две рамнини, а кристалографските темиња со пресек на три или повеќе раба.

Нивната меѓусебна зависност се изразува со изразот:

$$P + C = R + 2$$

каде е:

- $P$  – кристалографски рамнини;
- $C$  – кристалографски темиња;
- $R$  – кристалографски рабови.

Зависно од тоа како кристалните рамнини се поставени во однос на кристалните оски, постојат повеќе типови кристални рамнини. Растојанијата од центарот „O“ до пресекот на кристалната рамнина со секоја кристалографска оска (A, B и C) точно ја определуваат нејзината положба. Притоа овие растојанија се означуваат како:  $OA = a$ ,  $OB = b$ ,  $OC = c$ . Со должината на исечоците се дефинира кристалографска рамнина (во рамките на елементарната кристална ќелија), поради што  $a$ ,  $b$ , и  $c$  уште се нарекуваат и параметри на кристалната рамнина.

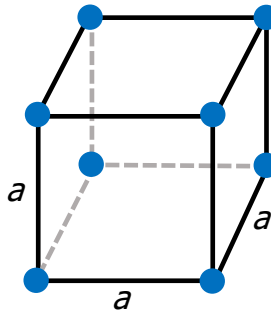
Зависно од меѓусебната положба на кристалографските оски, аглие помеѓу нив, и релативниот однос на должините на рабовите на елементарната кристална ќелија, постојат следните кристални системи:

- кубичен кристален систем
- тетрагонален кристален систем
- ромбичен кристален систем
- ромбоедарски кристален систем
- моноклиничен кристален систем
- триклиничен кристален систем
- хексагонален кристален систем.

Кубичниот кристален систем ги опфаќа сите кристални форми што имаат три еднакви по должина кристалографски оски кои помеѓу себе зафаќаат агол од  $90^\circ$ .

$$a = b = c \quad a = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Геометриската форма на овој систем е коцка.

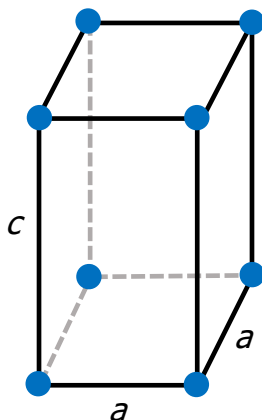


**Слика 31.** Кубичен кристален систем

Тетрагоналниот кристален систем ги опфаќа кристалните форми што имаат две еднакви по должина кристалографски оски во хоризонтална положба ( $a$  и  $b$ ) и една вертикална кристалографска оска ( $c$ ) различна по должина (пократка или подолга). Сите оски помеѓу себе зафаќаат агол од  $90^\circ$ .

$$a = b \neq c \quad a = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Геометриската форма на овој систем е правоаголен паралелопипед со основа квадрат.



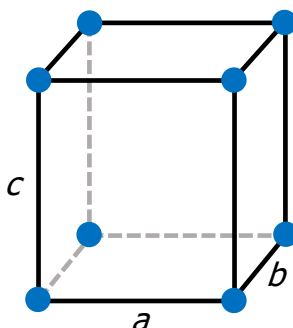
**Слика 32.** Тетрагонален кристален систем

Ромбичниот кристален систем ги опфаќа кристалните форми што имаат три кристалографски оски различни по должина кои помеѓу себе зафаќаат агол од  $90^\circ$ . Која било од оските можеме да ја избереме за главна и да ја поставиме вертикално ( $c$ ). Другите две кристалографски оски лежат во хоризонталната рамнина, при што подолгата се поставува да биде макрооска ( $b$ ), а пократката хоризонтална оска се означува со ( $a$ ).

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Геометриската форма на овој систем е правоаголен паралелопипед со основа правоаголник.



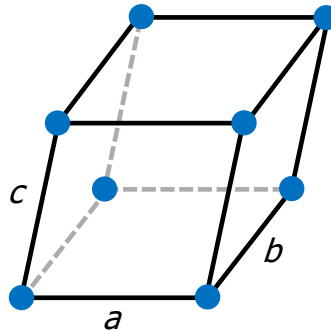
**Слика 33.** Ромбичен кристален систем

Ромбодарскиот кристален систем ги опфаќа кристалните форми што имаат три кристалографски оски еднакви по должина кои помеѓу себе зафаќаат ист агол различен од  $90^\circ$ .

$$a = b = c$$

$$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$

Геометриската форма на овој систем е ромбодар, односно основата е ромб.



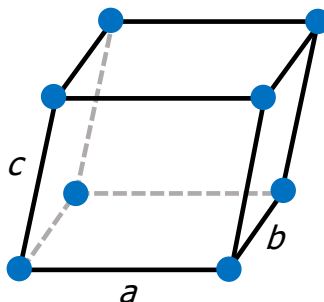
**Слика 34.** Ромбодарски кристален систем

Моноклиничниот кристален систем ги опфаќа кристалните форми што имаат три кристалографски оски различни по должина ( $a$ ,  $b$  и  $c$ ). Вертикалната оска ( $c$ ) ја зазема основната положба. Оската ( $a$ ) е поместена од својата хоризонтална положба поради што во однос на оската ( $c$ ) зафаќа агол  $\beta \neq 90^\circ$ . Во однос на оската ( $b$ ), оската ( $a$ ) зазема агол од  $90^\circ$ .

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \gamma = 90^\circ; \beta \neq 90^\circ$$

Геометриската форма на овој систем е прав паралелопипед со основа паралелограм.

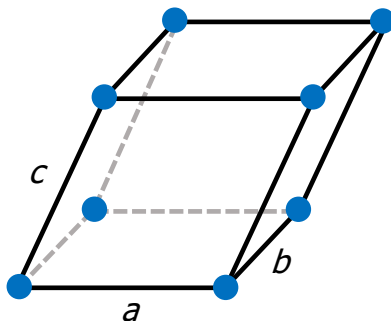


**Слика 35.** Моноклиничен кристален систем

Триклиничниот кристален систем ги опфаќа кристалните форми што имаат три кристалографски оски различни по должина ( $a$ ,  $b$  и  $c$ ), кои помеѓу себе не зафаќаат исти агли (различни од  $90^\circ$ ).

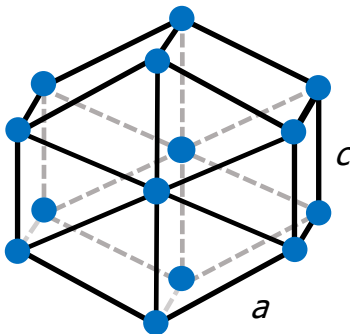
$$a \neq b \neq c \quad a \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$

Геометриската форма на овој систем е косоаголен паралелопипед.



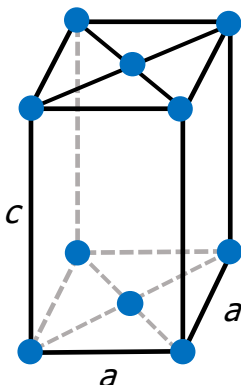
**Слика 36.** Триклиничен кристален систем

Хексагоналниот кристален систем ги опфаќа кристалните форми што имаат три еднакви по должина оски поставени во иста рамнина кои помеѓу себе зафаќаат агол од  $60^\circ$ , како и една оска ( $c$ ), која е различна по должина (пократка или подолга), која е поставена во однос на останатите оски под агол од  $90^\circ$ .



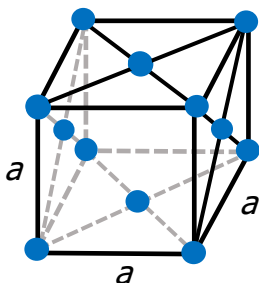
**Слика 37.** Хексагонален кристален систем

Кај основните кристални ќелии атомите се наоѓаат само на темињата. Доколку, освен на темињата, атоми има и во центрите на двете спротивни основи, ќелијата е базно центрирана. Вакви кристални ќелии има кај ромбичниот и моноклиничниот кристален систем.



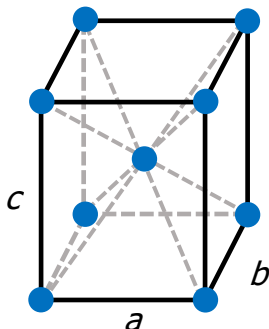
**Слика 38.** Базно центрирана ќелија, тетрагонален систем

Ако кристалната ќелија освен по темињата има атоми и во центрите на сите свои страни, се нарекува површински центрирана. Вакви кристални ќелии има кај кубичниот и ромбичниот систем.



**Слика 39.** Површински центрирана ќелија, кубичен систем

Постојат и просторно центрирани кристални ќелии, каде освен по темињата, атоми има и во нивниот волуменски центар. Вакви ќелии има кај кубниот, ромбичниот и тетрагоналниот систем.



**Слика 40.** Просторно центрирана ќелија, ромбичен систем

Многу важен параметар при дефинирањето на кристалните форми во геометриската кристалографија е симетријата. Под симетрија во општ случај се подразбира својството на некоја фигура по геометриски пат со помош на ротација или различни рефлексии да дојде до примарната состојба, односно форма. Основните елементи на симетријата се: оска на симетрија, рамнина на симетрија и центар на симетрија.

Оска на симетрија ( $L$ ) претставува замислена права околу која кристалот може да ротира, при што за точно определен интервал ( $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $180^\circ$ ) идентично се повторуваат основните елементи на кристалот. Во зависност од интервалот на ротација, при кој доаѓа до повторување на основните елементи на кристалот, се разликуваат повеќе типови на оски на симетрија:

- $L_2$  – дигира, или оска на симетрија од втор степен, каде за целосна ротација од  $360^\circ$  основните елементи на кристалот се повторуваат два пати, односно на секои  $180^\circ$ ;

- $L_3$  – тригира, или оска на симетрија од трет степен, каде за целосна ротација од  $360^\circ$  основните елементи на кристалот се повторуваат три пати, односно на секои  $120^\circ$ ;

- $L_4$  – тетрагира, или оска на симетрија од четврти степен, каде за целосна ротација од  $360^\circ$  основните елементи на кристалот се повторуваат четири пати, односно на секои  $90^\circ$ ;

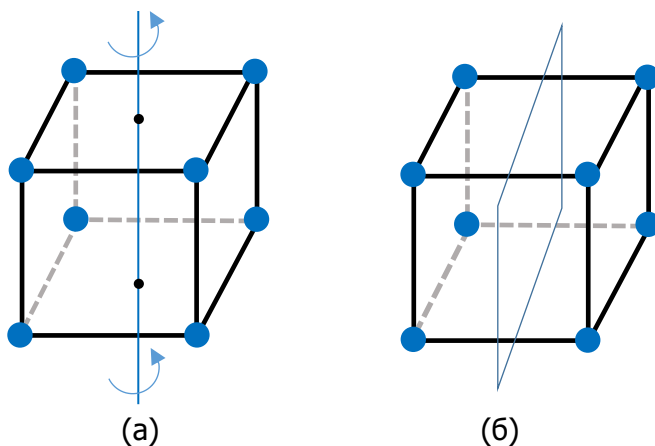
- $L_6$  – хексагира, или оска на симетрија од шести степен, каде за целосна ротација од  $360^\circ$  основните елементи на кристалот се повторуваат шест пати, односно на секои  $60^\circ$ .

Различните кристали со различните типови кристални системи имаат повеќе кристални оски на симетрија, кои може да бидат и од различен тип. Исто така, има и кристали кои воопшто немаат оски на симетрија.

Рамнина на симетрија претставува замислена рамнина која го дели кристалот на два идентични дела, односно како објект и лик во огледало. Еден кристал може да има повеќе рамнини на симетрија, но, исто така, може и воопшто да нема рамнина на симетрија.

Центар на симетрија претставува замислена точка во однос на која сите елементи на кристалот имаат симетрични елементи на спротивната страна на исто растојание, но спротивен правец. Центарот на симетрија се означува со ( $C$ ). Кристалот може да има само еден центар на симетрија. Центарот на симетрија ( $C$ ) секогаш е и геометриски центар, при што не важи и спротивното, односно геометрискиот центар не мора да биде и центар на симетрија.

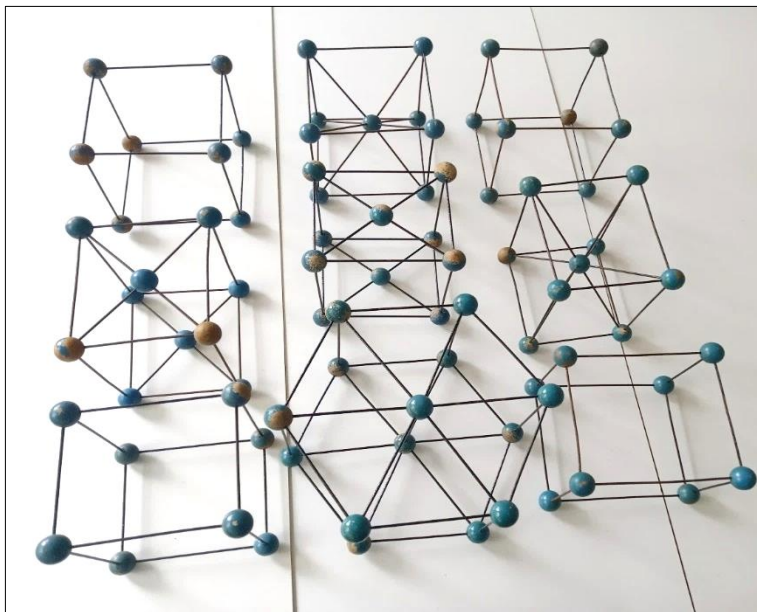




**Слика 41.** Елементи на симетрија: оска (а), и рамнина (б)

### Лабораториска вежба

Да се дефинираат основните кристалографски елементи: кристален систем, број на рабови, темиња, страни, рамнини на симетрија и оски на симетрија на следните модели на кристални тела (достапни како лабораториски физички модели).



**Слика 42.** Модели на кристални тела

## 3. ТЕХНОЛОШКА ПОДГОТОВКА НА МИНЕРАЛНИТЕ СУРОВИНИ

### 3.1. ДРОБЕЊЕ

Дробењето е примарна операција во процесот на отворање и уситнување на суровините. Тоа е механичка операција каде што под влијание на сила се врши механичка деструкција на материјалот (суровината). Дробењето може да биде едностепено или повеќестепено во зависност од поставените цели, особините на материјалот кој се дроби, како и од карактеристиките на дробилката. Ефикасноста на дробењето се дефинира како „степен на дробење“ кој претставува однос на максималниот дијаметар на зрната на влезниот материјал спрема максималниот дијаметар на зрната на излезниот материјал.

$$i = \frac{D_{max}}{d_{max}}$$

каде:

$i$  – степен на дробење;

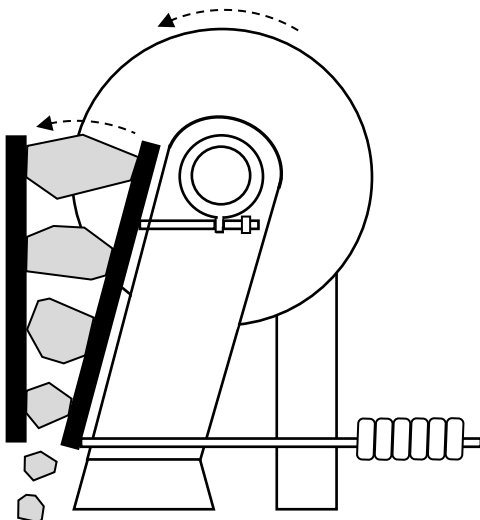
$D_{max}$  – максимален дијаметар на зрната на влезниот материјал;

$d_{max}$  – максимален дијаметар на зрната на излезниот материјал.

Кај дробилките најчесто се применуваат сили на гмечење, смолкнување и удар. Во зоната на дробење силата може да има константно или, пак, наизменично дејство. Дробилката треба да биде така конструирана да обезбеди непрекинат проток на материјал во зоната на дробење, како и брзо изнесување на веќе издробениот материјал. Дробилката со валци припаѓа во дробилки со константно дејство на сила, а во дробилки со наизменично дејство на сила се вбројуваат челусна, кружна и конусна дробилка. Во посебна група може да се вбројат оние дробилки каде се применува сила на удар (дробилка со чекан). За примарно дробење се користат, пред сè, челусни, кружни и конусни дробилки, а поретко дробилки со чекан.

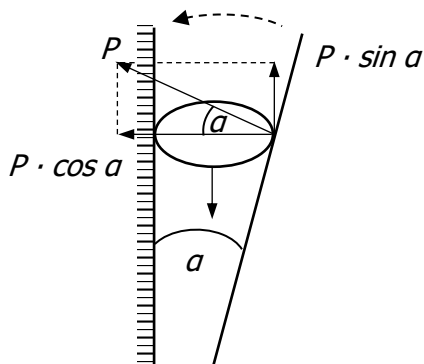
За средно дробење се користат кружни, конусни и дробилки со чекан, а поретко дробилки со валци. За фино дробење се користат дробилки со валци, дробилки со чинии и специјални кружни дробилки.

**Челусната дробилка** доминантно се применува за примарно дробење. Се употребува за дробење цврсти до средно цврсти материјали. Гмечењето на материјалот се изведува така што парчето се движи со мала брзина помеѓу плочите кои се доближуваат и се разделуваат една од друга со мала амплитуда. Влезот на материјалот е во горниот дел, а од долниот дел се изнесува веќе издробениот материјал. Транспортот на материјалот низ зоната за дробење се изведува само со помош на гравитационата сила. Плочите не се паралелни и конвергираат спрема долу, поради што зоната на дробење е во облик на буквата *V*. Статичната и подвижната плоча, со неподвижните странични сидови, формираат клинеста форма. Отворот помеѓу нив може да се регулира со вметнување или замена на плочи. Составните делови во зоната на дробење се покриени со заштитни плочи за абеење кои можат да се заменат, и се сместени во цврста и тешка рамка. Кај челусните дробилки степенот на уситнување на материјалот изнесува околу 3.



**Слика 43.** Шема на челусна дробилка – пресек

На слика 44 е прикажан пресек на челусна дробилка со агол помеѓу плочите  $\alpha$ . Во зоната на дробење се наоѓа парче материјал. Силата на дробењето  $P$ , која дејствува нормално на подвижната плоча, може да се разложи на хоризонтална компонента  $P \cdot \cos \alpha$ , и вертикална компонента  $P \cdot \sin \alpha$ .



**Слика 44.** Рамнотежа на парче материјал што се дроби

Под влијание на притисокот се создава сила на триење која зависи од коефициентот  $f = \operatorname{tg} \varphi$ . Според тоа на плочите дејствува хоризонталната сила на триење ( $f \cdot P \cdot \cos a$ ) која е спротивна од вертикалната ( $f \cdot P \cdot \sin a$ ). Вкупното дејство на силата на триење изнесува ( $2 \cdot f \cdot P \cdot \cos a$ ). За парчето материјал да не скокне, односно да биде зафатено од плочите и издробено, потребно е да биде задоволен условот:

$$2 \cdot f \cdot P \cdot \cos a \geq P \cdot \sin a$$

односно:

$$\frac{\sin a}{\cos a} \leq 2 \cdot f$$

или:

$$\operatorname{tg} a \leq \operatorname{tg} 2$$

Според тоа, аголот помеѓу плочите треба да биде:  $a \leq 2 \varphi$ . Доколку аголот помеѓу плочите не е доволно голем, парчето материјал може да испадне од челустите. Аголот помеѓу плочите зависи и од особините на материјалот што се дроби, односно за потврди суровини треба да изнесува околу  $24^\circ$ , а за помеки суровини со рамни површини околу  $18^\circ$ . Капацитетот на челусната дробилка зависи од димезијата на долниот отвор за празнење, а се зголемува со зголемување на бројот на вртежи на оската која ја движи подвижната плоча. За оптимален број на вртежи е потребно да биде исполнет условот:

$$n = \frac{400}{\sqrt{s}}$$

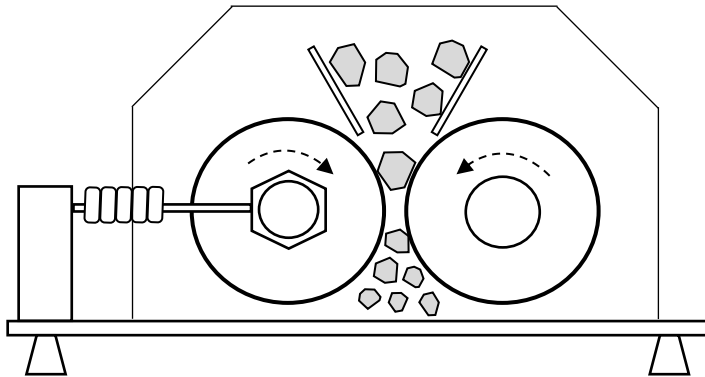
каде:

$n$  – број на вртежи на оската во минута;

$s$  – патот на подвижната плоча.

**Дробилката со валци** доминантно се применува за секундарно дробење, до пофини димензии на зрна. Нејзини основни функционални делови се два валци кои ротираат еден спрема друг и се поставени на две паралелни осовини. Валците може да бидат мазни, назабени или ребрести. Ротираат навнатре (во спротивна насока) и притоа создаваат зона на дробење во форма на буквата *V*. Во зоната на дробење парчињата материјал се дробат под дејството на импулсот на притисокот кој го создаваат валците.

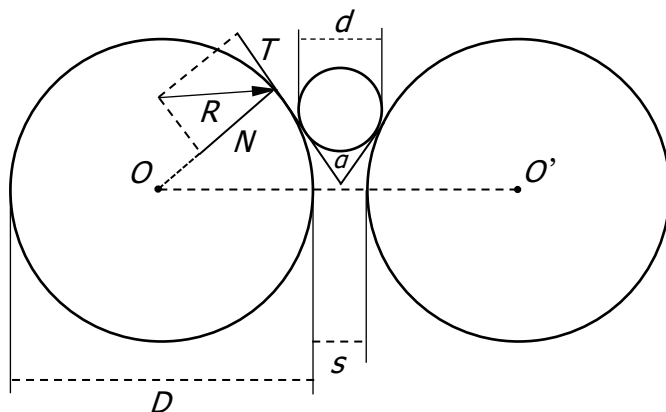
Валците се поставени на работни осовини кои се сместени во лежишта на рамката на дробилката на спротивните страни. Осовината на предниот валјак се наоѓа во лежиште кое може да се поместува со шипки за затегнување кои се снабдени со јаки амортизери сместени на предната страна на дробилката. Осовината на едниот валјак е статична, додека осовината на другиот валјак е подвижна. Растојанието помеѓу валците се регулира со помош на подметки во вид на плочи кои се ставаат помеѓу неподвижните и подвижните лежишта на осовината. Дробилката е затворена во метално куќиште.



**Слика 45.** Дробилка со валци – пресек

Постојат два начина на полнење на дробилката: рамномерно полнење, без затрупување на зоната на дробење, и полнење со затрупување. Полнењето без затрупување дава издробен материјал со рамномерна големина на зрна и со многу мал удел на ситна фракција. Доколку при полнењето доаѓа до затрупување на валците, се оневозможува индивидуално движење на зрната и класичната теорија на аголот за зафаќање не се реализира во целост. Капацитетот на дробилката со валци зависи од брзината на вртење на валците, нивниот пречник и растојанието помеѓу нив. Степенот на уситнување на материјалот најчесто е во границата од 1,5 до 2.

На слика 46 е дадена шема на дробилка со валци и едно сферично зрно материјал во положба да може да биде издробено.



**Слика 46.** Дијаграм на сили кај дробилка со валци  
 $D$  – дијаметар на валјак;  $d$  – дијаметар на зрно;  
 $s$  – растојание помеѓу валците;  $\alpha$  – агол на зафаќање на зрното

На зрното дејствуваат (свесно ја запоставуваме гравитационата сила) нормалната сила  $N$  и тангенсијалната сила  $T$ . Дали зрното ќе биде транспортирано во зоната на дробење и издробено ќе зависи од односот на вертикалните компоненти на силите  $N_V$  и  $T_V$ .

$$N_V = N \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \qquad T_V = T \cdot \cos \frac{\alpha}{2}$$

Доколку правецот на резултантната сила  $R$  е надолу, зрното ќе биде зафатено од валците, транспортирано во зоната на дробење и издробено. За тоа треба да биде задоволен условот  $T_V > N_V$ . Во спротивно зрното ќе потскокнува над валците, и нема да биде издробено. Критичен услов за тоа е  $T_V = N_V$ .

$$N \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = T \cdot \cos \frac{\alpha}{2}, \text{ односно } \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{T}{N}$$

Исто така, потребно е и големините  $D$ ,  $d$ ,  $\alpha$  и  $s$  да бидат во следниот геометриски сооднос:

$$\frac{s}{2} + \frac{D}{2} = \left( \frac{D}{2} + \frac{d}{2} \right) \cdot \cos \frac{\alpha}{2}$$

## Лабораториска вежба

Дробењето претставува примарна механичка операција, со која се врши грубо намалување на димензијата (уситнување) на зрната на минералната суровина. Притоа дробењето може да биде едностепено или повеќестепено, зависно од карактеристиките на материјалот, како и од соодветниот технолошки процес.

На лабораториски вежби материјалот почетно се дроби на челусна дробилка тип BLAKE (слика 47) до димензија на зрната од 1 cm. Материјалот се внесува во челусната дробилка од горната страна, а здробениот материјал под влијание на гравитационата сила се движи надолу и излегува од долната страна на дробилката. Притоа, поради безбедносни причини, мора да се внимава при внесување на материјалот да не се допираат работните делови на машината и да се стои од страна од дробилката (не над неа) за да се избегне повреда од прскање на материјалот. Исто така, треба редовно да се празни садот од дното од дробилката за да не дојде до нејзино преполнување, со што се запира протокот на материјал.



**Слика 47.** Челусна дробилка тип BLAKE

Потоа материјалот трикратно се дроби на дробилка со валци тип DENVER B7141A (слика 48), со растојание помеѓу валците од 8 mm, 3 mm, и 1 mm. Од горната страна материјалот се внесува во дробилката со валци, при што поминува помеѓу валците, се дроби и под влијание на гравитационата сила излегува од долната страна. При работа со дробилка со валци треба да се внимава валците никогаш да не се допираат еден со друг, како и тоа да се стои од страна на машината поради прскање на материјалот при дробење.



**Слика 48.** Дробилка со валци тип DENVER B7141A

За да се спореди намалувањето на димензиите на зрната, треба да се направат фотографии од материјалот по секоја фаза од дробењето. По дробењето на дробилката со валци при растојание на валците од 1 mm, да се направи мокра ситова анализа. Притоа да се користи комплет стандардни сита со димензија на отворите од 1 mm; 0,5 mm; 0,1 mm и 0,063 mm. Резултатите од мократа ситова анализа да се презентираат табеларно и во форма на хистограми. Исто така, да се направи преглед на бинокуларен микроскоп на различните димензиони фракции на зрна.



### 3.2. МЕЛЕЊЕ

По дробењето, како секундарна операција во процесот на уситнување на суровината, доаѓа мелењето. Мелењето може да биде мокро или суво, едностепено или повеќестепено, зависно од поставените цели, особините на материјалот кој се дроби, како и од карактеристиките на мелницата.

Мелењето претставува краен стадиум на уситнувањето до гранична големина на зрна која е потребна за понатамошна примена на суровината. Димензијата на зрната претставува репрезентативна големина која го изразува степенот на уситнување на материјалот. По процесот на отворање, сомелениот материјал може да се разгледува како полидисперзен систем со различна големина на зрна. Доколку зрната немаат симетричен облик, потребно е да се дефинира факторот на облик кој го дава односот помеѓу вистинската вредност на површината, односно волуменот на зрната и површината, односно волуменот пресметани од нивните измерени големина.

Кај мелењето уситнувањето на материјалот се изведува под дејство на сила на притисок, удар, како и при триење на тенок слој од суровината помеѓу тврди површини кои се движат тангенцијално една во однос на друга и создаваат доволно јак притисок да може да дојде до разорување на зрното. За да се постигне висок капацитет при мелењето, површините за мелење треба да се големи, што се постигнува со голем број на релативно мали тврди тела, односно топки, шипки и друго.

Мелниците претежно се конструирани во вид на хоризонтални цилиндри кои ротираат околу својата оска. Зависно од конструкцијата и намената можат да работат континуирано и дисконтинуирано, во работни услови на суво или со вода. Во самите мелници како работни површини се дефинираат облога и топки кои се тркалаат во нивната внатрешност. Освен топки, се користат и метални шипки, при што се добива крупнозрн продукт. Облогата и топките се од тврд материјал, кој се одбира во зависност од намената на материјалот кој се меле. Доколку не е важно секундарното внесување метал во мелениот материјал, тогаш облогата и топките се од челик, а доколку не смее да дојде до секундарно онечистување, тогаш облогата и топките се од тврд неметален материјал (порцелан, стеатит, кварцит и др).

Самата ефикасност на работата на мелниците тешко се утврдува поради недостиг на мерила за корисно потрошена работа. Затоа договорно се зема ефикасноста на работата при мелење да се изразува преку потрошената електрична енергија, односно во тони уситнет материјал, а за кој е потрошен 1 kWh електрична енергија. Мелењето влегува со најмалку 25 % од вкупните трошоци при подготовка на суровината. Капацитетот на мелниците се изразува преку количината на сомелен материјал до соодветна големина во единица време.

Во пракса доминантно се применуваат мелниците со топки. Мелницата може да се полни до околу 45 % од својот волумен, во што спаѓаат топки/шипки и материјал, а при мокро мелење и водата. Соодносот топки:материјал = 1:2 – 3, треба да биде запазен. Доколку соодносот топки : материјал е помал, мелењето ќе биде побавно и похомогено во однос на големина на зрна, а доколку се зголеми (на пр., 1:3) ќе се зголеми и брзината на мелење, а со тоа и уделот на поситната фракција.

Доколку мелењето се изведува по мокра постапка, многу важен параметар е односот течно:цврсто. Густината на пулпата се движи во широки граници, односно од 55 до 80 % цврст материјал. Густата пулпа го спречува лизгањето на топките и влијае на движењето на сомелениот материјал низ мелницата. Премногу разредена пулпа доведува до сегрегација на топките и покрупните зрна материјал, што го редуцира ефектот на мелењето и го зголемува абењето на облогите за мелење.

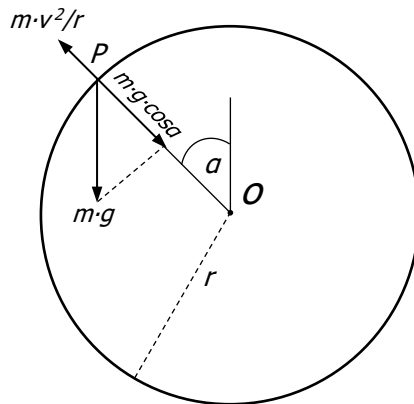
Влијание врз процесот на мелење на материјалот, исто така, имаат и мелните тела (топките). Важни параметри се димензиите и масата на топките. Пречникот на топките се движи од 25 до 150 mm. Поголемите топки се употребуваат за мелење потврди и покрупни материјали.

Движењето на топките во мелницата и нивното дејство врз материјалот ќе зависи од повеќе фактори:

- брзината на ротација (вртење) на мелницата;
- соодносот материјал:топки;
- карактеристиките на топките;
- карактеристиките на внатрешната облога на цилиндарот;
- димензијата на мелницата;
- особините на материјалот што се меле и друго.

Движењето на топките доминантно зависи од брзината на ротација. Брзината на ротација најчесто се изразува како процент од критичната брзина, односно брзина при која топките се под влијание на центрифугалната сила (доминантна е во однос на гравитационата) и остануваат прилепени за облогата на мелницата, пратејќи го нејзиното вртење. Во пракса, брзината на ротација на мелницата се движи од 53 до 86 % од критичната брзина и при тие услови се спречува топките да се вртат прилепени за облогата на мелницата.

При движењето на секоја топка дејствуваат две сили: центрифугална сила и силата на тежината на топката.



**Слика 49.** Шема на движење на топка во мелница

Центрифугалната сила  $F_C$ , која има тенденција да ја прилепи топката за мелницата, е дефинирана со изразот:

$$F_C = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

каде е:

$m$  – масата на топката;

$v$  – периферната брзина со која се врти мелницата;

$r$  – радиус на мелницата.

Радијалната компонента на силата од тежината на топката е насочена по радиусот:

$$F_G = m \cdot g \cdot \cos a$$

каде е:

$m$  – масата на топката;

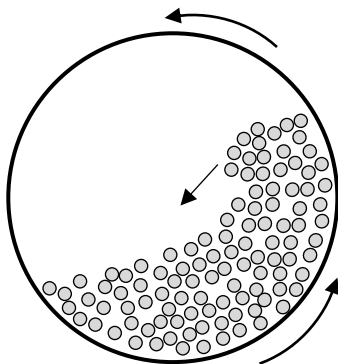
$g$  – земјино забрзување;

$a$  – агол помеѓу вертикалната оска и радиус векторот низ точката на контакт  $P$ .

Траекторијата по која ќе се движи топката во мелницата претставува резултанта од овие две сили. Според тоа, траекторијата на движењето на топката зависи од периферната брзина со која се врти мелницата (односно, од брзината на ротација), од масата на топката и од радиусот на мелницата. Доминантен фактор е брзината на ротација на мелницата. Во зависност од брзината на ротација (вртење) топките во мелницата може да имаат различно движење, а со тоа да има и различни механизми на мелење на материјалот.

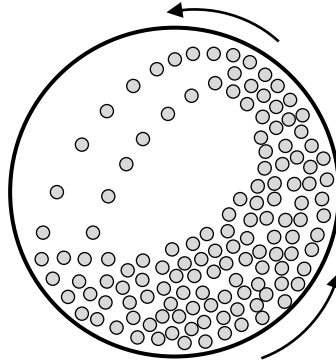
При помали брзини на ротација на мелницата гравитационата сила е преобладавајќи во однос на центрифугалната сила. Поради тоа топките се позиционирани на дното од мелницата и ротираат околу своите оски кои се паралелни со оската на мелницата, само минимално придвижувајќи се по ѕидот на мелницата во правецот на ротација (и назад). Притоа се јавува триење (атриција) помеѓу топките и мелницата, како и помеѓу самите топки, поради што материјалот се меле.

При каскадно движење топките во прв момент, поради поизразеното влијание на центрифугалната сила, го следат движењето на мелницата, сè додека не дојдат до определена висина каде има состојба на динамичка рамнотежа (центрифугална и гравитациона сила). Потоа гравитационата сила станува доминантна и топките се тркалаат кон дното на мелницата.



**Слика 50.** Каскадно движење на топки во мелница

Катарактно движење на топките се случува при нешто поголеми брзини на ротација на мелницата. Притоа движењето на топките може да се подели на два стадиуми: кружно и параболично. Кружното движење е поголемо поради поизразеното влијание на центрифугалната сила, по што топката паѓа од поголема висина и на тој начин со удар го уситнува материјалот.



**Слика 51.** Катарактно движење на топки во мелница

Во услови на рамнотежа, центрифугалната компонента на агловото забрзување е еднаква со центрипеталната компонента на гравитационата сила, односно:

$$\frac{m \cdot v^2}{r} = m \cdot g \cdot \cos a$$

Потоа, влијанието на центрифугалната сила станува доминантно, па топката се одвојува од облогата на мелницата и почнува слободно да паѓа.

Механизмот на мелење битно се разликува во зоната каде топката го следи движењето на мелницата, и зоната каде топката слободно паѓа. Во зоната каде топките го следат движењето на мелницата, под влијание на нивната тежина и притисокот што го прават другите топки над неа, поголемите минерални зрна се изложени на триење, при што доаѓа до отцепување на помали делови од зрното. Зрната со понеправилен облик ќе бидат полесно зафатени помеѓу топките и телото на мелницата и произмелени. Во зоната каде топките се тркалаат кон дното на мелница, а особено во зоната каде топката слободно паѓа, зрната се изложени на дејства на сили кои ги создаваат ударите на топките при нивното слободно паѓање. Притоа во средишниот дел се јавува таканаречена мртва зона, каде нема движење на топки, ниту, пак, мелење. Таа зона е поголема кај каскадното, а помала кај катарактното мелење.

При брзини на ротација поголеми од критичната брзина топките се движат единствено под влијание на центрифугалната сила која е предоминантна и остануваат прилепени за облогата на мелницата, пратејќи го нејзиното вртење, при што не доаѓа до мелење на материјалот.

## Лабораториска вежба

Секундарна операција при уситнувањето на материјалот е мелењето. Материјалот се меле на суво во порцеланска мелница со топки (слика 52). Дијаметарот и должината на мелницата се исти 0,4 m. Мелницата работи дисконтинуирано, со брзина на ротација од 65 врт./min. При овие услови режимот на мелење е комбиниран, односно претежно е катарактен, а помалку каскаден. Мелницата се полни до околу 45 % од својот волумен. Соодносот материјал:топки е потребно да изнесува 1:2,5 (3 kg материјал:7,5 kg топки).



**Слика 52.** Порцеланска мелница со топки

Материјалот се меле 60 min. Притоа контролни проби за анализа да се земат за различни фази од мелењето, односно по 10, 20, 30 и 45 min. За да се дефинира степенот на уситнувањето и да се увидат ефектите од мелењето, да се направи гранулометриска (мокра ситова) анализа на крајниот материјал, и да се спореди со пробите земени за анализа од различните фази на мелењето. При анализата да се користи комплет стандардни сита со димензија на отворите од 0,1 mm; 0,071 mm; 0,050 mm и 0,032 mm. Резултатите да бидат презентирани табеларно и во форма на хистограми. Исто така, да се направи и дијаграм за масената дистрибуција на различните димензиони фракции на зрна за различни фази од мелењето. На крај, различните димензиони фракции на зрна да се прегледаат на бинокуларен микроскоп и да се направи нивен опис.

### 3.3. ПРОТИВСТРУЈНО КЛАСИРАЊЕ

Противструјното класирање, кое уште се нарекува и елутрација, претставува метода за класирање на минералните зрна по димензија и специфична маса. Класирањето се базира на различната брзина на таложее на зрната и различната брзина на водената струја која се движи низ колоните вертикално нагоре. Брзината со која минералното зрно ќе се таложи во флуид (најчесто вода или воздух), пред сè, зависи од димензијата и специфичната маса. Имено, минералните зрна кои имаат поголем дијаметар или повисока специфична маса се таложат со поголема брзина во однос на зрната со помал дијаметар или пониска специфична маса. Притоа покрупно зрно со пониска специфична маса би можело да има слична брзина на таложее со поситно зрно со повисока специфична маса. Според тоа, при противструјното класирање се добиваат различни класи, зависно од резултантната брзина на таложее.

Брзината на таложее (седиментација) на зрната се определува во согласност со Стоксовиот закон за таложее на сферични честички во флуид, при ламинарен режим:

$$v = \frac{2 \cdot r^2 \cdot (\gamma_1 - \gamma_2) \cdot g}{9 \cdot \mu}$$

каде е:

$v$  – брзина на таложее, (cm/s);

$r$  – радиус на зрната, (cm);

$\gamma_1$  – специфична маса на материјалот, (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma_2$  – специфична маса на флуидот, (g/cm<sup>3</sup>);

$g$  – земјино забрзување, (cm/s<sup>2</sup>);

$\mu$  – вискозитет на флуидот, (g/cm·s).

Бидејќи противструјното класирање најчесто се реализира во вода како флуид чија што специфична маса изнесува  $\gamma = 1$ , а вискозитет  $\mu = 0,01$  (при  $t = 20^\circ\text{C}$ ), и доколку се замени  $2r = d$  (дијаметар), брзината на таложее ќе биде:

$$v = 545 \cdot d^2 \cdot (\gamma_1 - 1)$$

Постројката за противструјно класирање претставува систем од „X“ вертикални елутрациони колони со различен дијаметар, поставени паралелно една со друга. Притоа дијаметарот на колоните последователно се зголемува. Низ колоните струи вода со константен проток. Водата се движи вертикално низ колоните, односно влегува во долниот дел и излегува на горниот дел од колоната, по што се внесува во долниот дел на следната колона итн. Брзината на струење на водата низ колоните се определува од изразот:

$$W = \frac{Q}{A}$$

каде е:

$W$  – брзина на струење на водата низ колоната, ( $cm/s$ );

$Q$  – проток на водата, ( $cm^3/s$ );

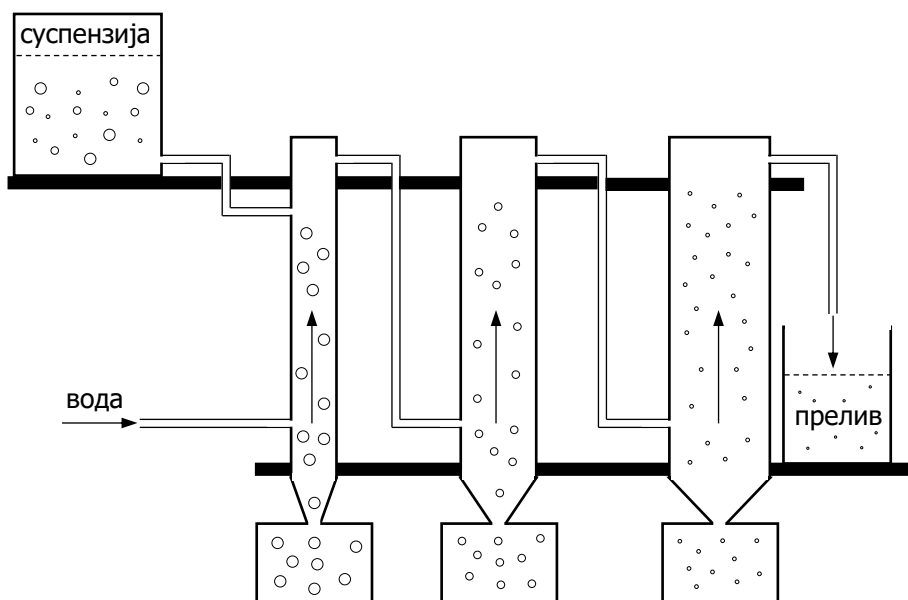
$A$  – напречен пресек на колоната, ( $cm^2$ ).

Дијаметарот на колоните постепено се зголемува во правец на течението на водата. Бидејќи протокот на водата низ колоните е константен  $Q = const.$ , како расте дијаметарот на колоните, обратно пропорционално ќе се намалува брзината на струење на водата низ колоните. Затоа во правец на течението на водата од една до друга колона ќе има постепено намалување на брзината на водата во самите колони. Треба да се има предвид дека брзината на струење на водата не е константна по целиот напречен пресек на колоната. Притоа брзината на струење е пониска до ѕидот на колоната поради силите на смолкнување, а повисока во центарот на колоната, што минимално влијае на ефектот на процесот.

Подготвениот материјал за елутрација се меша со вода (суспензија) и континуирано се додава преку горниот дел на првата колона. Под влијание на гравитационата сила материјалот почнува да се таложи. Доколку брзината на таложење е поголема од брзината на водата ( $v > W$ ) која противструјно тече низ колоната, минералното зрно ќе се исталожи на дното од колоната. Во спротивно, доколку брзината на таложење е помала од брзината на водата ( $v < W$ ), минералното зрно ќе биде однесено од водата и транспортирано во следната колона каде водата струи со помала брзина. Доколку и таму не се исталожи, минералното зрно ќе биде транспортирано во наредната колона каде ќе може да се исталожи итн. Според тоа, при противструјното класирање секое минерално зрно ќе се исталожи во соодветната колона каде што неговата брзина на таложење е поголема од брзината на водата која вертикално струи нагоре.



Бројот на колоните се дефинира според потребата на колку класи треба да се класира материјалот (секоја колона дава една класа, а истечната вода се нарекува прелив и во неа се содржани најситните и најлесните зрна материјал). Талогот од првата колона по димензија е најкрупен, а талозите од последователните колони се сè поситни и поситни. Исто така, брзината на струење на водата (протокот) може да се менува според потребата, а со цел во соодветната колона да се класираат зрна во определени граници.



**Слика 53.** Шематски приказ на постројка за противструјно класирање (елутрација)

Работата започнува со подготовка на постројката, која се полни со вода и се определува зададениот проток на вода (со мерење на количество вода во минута која истекува од последната колона). Претходно подготвениот материјал за елутрација се меша со вода (се подготвува суспензија) во зададен сооднос материјал:вода (најчесто 1:10) и континуирано се внесува во првата колона со мал проток, со што се избегнува затнување на цевките и се овозможува полесна сепарација на зрната во разредена суспензија. По завршување на додавањето на суспензијата, водата се остава да тече сè додека приливот не се избистри. Потоа се прекинува дотокот на вода и се чека да се исталожи материјалот кој лебди во колоните.

Класирањето на минералните зрна може да биде според димензија (големина) или специфична маса. Доколку се работи за условно мономинерална сировина (со минимален удел на примеси), тогаш се врши класирање според димензија на зрно. Доколку се работи за полиминерална сировина, целта на процесот на елутрација е различните компоненти да се сепарираат една од друга. Во тој случај материјалот за елутрација треба да биде соодветно подготвен, односно димензијата на минералните зрна да биде во тесни граници. Тоа е потребно за разликата во брзините на таложеење да биде исклучиво поради различната специфична маса (различни минерални компоненти), а не поради различните димензии на минералните зрна. Во спротивно, може да се случи помали зрна од компонентата со поголема специфична маса да се таложат побрзо, отколку поголеми зрна од друга компонента со помала специфична маса.

### **Лабораториска вежба**

Постројката се состои од 3 вертикални колони низ кои струи вода во вертикална насока од долу кон горе (слика 54). Талогот од првата колона по димензија е најкрупен, а талозите од последователните колони се сè поситни. Исто така, брзината на струеење на водата (протокот) може да се менува според потребата, а со цел во соодветната колона да се класираат зрна во определени граници. Работата започнува со подготовка на постројката која се полни со вода и се определува зададениот проток на вода со мерење количество вода во минута која истекува од последната колона. За ефикасно противструјно класирање протокот би требало да биде околу  $600 - 800 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Измелениот материјал (измерена количина околу 400 g) се меша со вода (се прави суспензија) во зададен сооднос материјал:вода = 1:10. Суспензијата континуирано се внесува во инката на првата колона, со мал проток, со што се избегнува затнување. По завршувањето на процесот на додавање на суспензијата, се остава водата да тече сè додека преливот не се избистри. Потоа се затвора дотокот на вода и се чека да се исталожи материјалот кој лебди во колоните. Потоа се празнат колоните, а талозите (класите) се сушат во сушара. По сушењето, талозите се мерат и соодветно обележуваат.



**Слика 54.** Лабораториска постројка за противструјно класирање (елутрација)

Потребно е да се направи материјален биланс, односно да се дефинира масениот удел на класите зрна добиени од секоја колона. Резултатите да се презентираат табеларно и во форма на хистограми. Исто така, бидејќи е познат протокот на водата, да се пресмета брзината со која водата струи во секоја од колоните. Во согласност со тоа, за секоја колона да се дефинира минималната димензија на зрна од присутните минерални фази во суровината кои ќе се таложат во неа. Повторно да се направи бинокуларен преглед на различните класи на зрна, како и да се посочат спецификите и разликите.

### 3.4. ЦЕНТРИФУГАЛНО КЛАСИРАЊЕ

Кај оваа метода за класирање се применува дејството на центрифугалната сила врз минералните зрна. Центрифугално класирање може да се врши во течен или гасен флуид (најчесто вода или воздух). Класирањето се реализира во поле на центрифугално забрзување каде што се развиваат големи брзини поради што самиот процес е доста краток. Центрифугалното класирање доминантно се применува за поситни (со помала димезија) зрна, чијашто димензија е во граници 0,5 – 0,005 mm.

При тангенцијалното внесување на суспензијата под притисок, таа добива интензивно кружно движење. Центрифугалната сила може да се пресмета по следната формула:

$$F_c = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

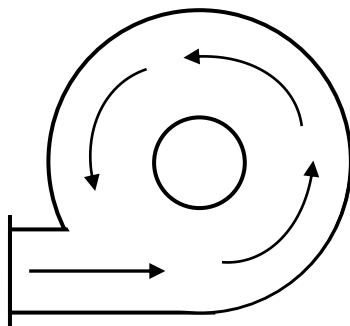
каде е:

$F_c$  – центрифугална сила;

$m$  – маса на зрното;

$v$  – брзина на суспензијата;

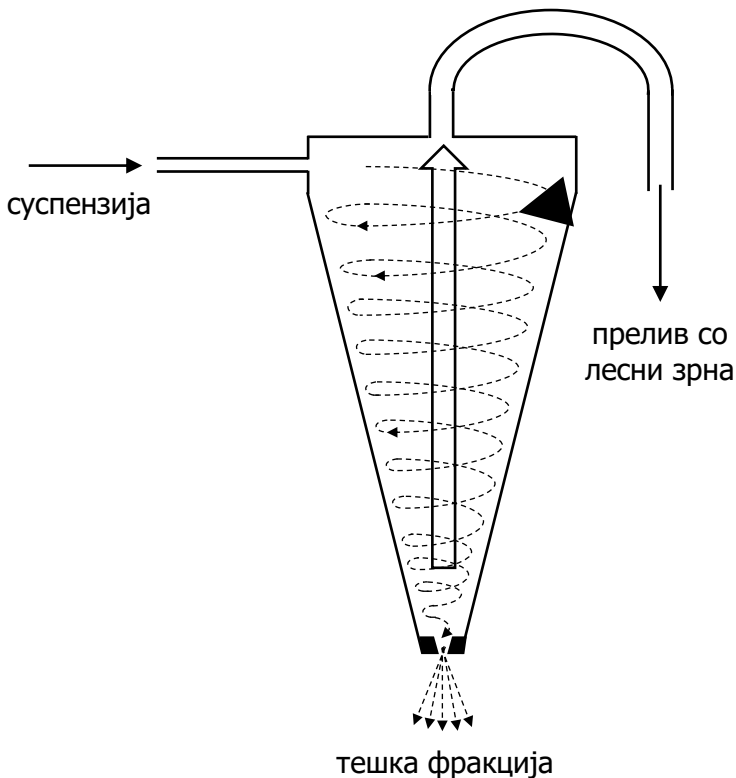
$r$  – растојание од оската на циклонот.



**Слика 55.** Дијаграм на струење на суспензијата во хидроциклон

Машините кои притоа се применуваат се циклони, односно хидроциклони (за водено класирање) и аероциклони (за суво класирање).

Хидроциклонот го дели материјалот на две класи: крупна (талог), која излегува преку отворот на дизната која е поставена во долниот дел, и ситна (прелив), која излегува преку преливната цевка поставена во горниот централен дел на циклонот. Тој е составен од вертикален конус и резервоар во кој е сместена суспензија од вода и минерални зрна. Притоа суспензијата се внесува во циклонот тангенцијално, под определен притисок. Со внесување на суспензијата под притисок, на траекторијата на движењето на минералните зрна покрај занемарливата гравитациона сила, влијае и доминантната центрифугална сила, чие дејство е поизразено кај потешките зрна (со поголема димензија и поголема специфична маса). Притоа потешките зрна се движат кружно покрај ѕидовите на циклонот и преку отворот на дизната која е поставена на дното излегуваат надвор. Ситната фракција, со централно вртоложно струење, се движи кон врвот и излегува како прелив. Сериски може да бидат поставени неколку циклони со дизни со различен отвор, при што материјалот ќе се класира во повеќе класи.



**Слика 56.** Шематски приказ на хидроциклон

Поради изразената центрифугална сила, во централниот дел на хидроциклонот доаѓа до разделување на суспензијата и создавање централен воден столб со потпритисок. Овој потпритисок овозможува делот од суспензијата каде што доминантно се наоѓа ситната (фина) фракција, со централно вртоложно струење да се движи кон врвот и преку преливната цевка да излегува како прелив. Границата помеѓу различните текови суспензија насочени нагоре и надолу се нарекува површина на нултни аксијални брзини.

Количината на издвоените класи ќе зависи од притисокот со кој суспензијата се внесува во хидроциклонот. Имено, висината на притисокот влијае на интензитетот на центрифугалната сила, односно на траекторијата на движењето на зрната. Повисокиот притисок покрај крупните и тешки зрна кон ѕидовите на хидроциклонот ги насочува и среднокрупните зрна. Помал притисок дава покрупен прелив, односно поголем притисок дава поситен прелив. Притисокот на суспензијата варира од 0,04 до 0,25 МРа. Соодветниот притисок на суспензијата се обезбедува преку центрифугална пумпа. Ефикасноста на класирањето зависи и од големината на долниот отвор (дизна), која, исто така, е со конусна форма на отворот. Колку е поголем отворот на дизната, во фракцијата песок ќе се одвојуваат покрупни зрна. Максималната димензија на зрната од крупната класа се регулира токму преку отворот на дизната. Практично, треба да се изнајдат оптимални соодноси на притисокот и дизната за да се добие ефикасно класирање на материјалот. Големината на хидроциклонот се дефинира преку дијаметарот на цилиндричниот дел кој варира до 1000 mm. Аголот на конусот е различен, но најчесто изнесува  $\alpha = 20^\circ$ . Внатрешната површина на конусот е обложена со гума.

Оваа метода може да се користи и како метода за концентрирање, но тогаш мора минералните зрна да се класирани во тесни граници на големина (слични по големина помеѓу себе) за да дојде до израз разликата во специфичната маса.

Аероциклонот (воздушниот класификатор) работи на сличен принцип како хидроциклонот, но наместо вода струи воздух. Пред сè, се употребува за материјали (сировини) каде е потребена сува метода на класификација, и најчесто се комбинира со мелница како контрола на процесот на мелење (суво). Притоа кај воздушниот класификатор ситната фракција се нарекува прашина, а крупната песок. Аероциклоните покрај за класирање (сепарација), исто така, може да се применуваат и за сушење во динамички услови, гранулирање и отпрашување.

## Лабораториска вежба

За лабораториската вежба центрифугално класирање, како почетна суспензија се користи преливот од претходната вежба за противструјното класирање (елутрација), каде што се наоѓаат најситните зрна. Системот за центрифугално класирање се состои од резервоар за суспензија, неколку хидроциклони, пумпа и манометар.



**Слика 57.** Хидроциклони

Најпрво, на циклонот со кој ќе се работи, во долниот дел му се поставува дизна со соодветен отвор (најчесто 1 – 3 mm). Суспензијата се префрла во долниот резервоар под хидроциклонот (пред тоа се проверува дали испустниот вентил од резервоарот е затворен). Се отвораат вентилот од резервоарот кон пумпата, вентилот за излез од пумпата и вентилот кон резервоарот (вентилот кон хидроциклонот сè уште е затворен). Се вклучува пумпата, при што суспензијата почнува да циркулира низ системот. Потоа внимателно се подзатвора вентилот кон резервоарот сè додека притисокот во манометарот не се искачи на 2 bar (работен притисок). Сега истовремено (многу внимателно) се дозатвора вентилот кон резервоарот, а истовремено се отвора вентилот кон хидроциклонот. Со тоа суспензијата се насочува кон хидроциклонот на класирање. Крупната класа која излегува од долниот дел на циклонот се собира во кофа, а ситната класа (преливот) во буре. Кога класирањето е при крај (исцрпена е суспензијата и доаѓа до опаѓање на влезниот притисок), мора да се додава свежа вода во резервоарот сè до избистрување на излезите од хидроциклонот.

Потоа суспензијата со ситната класа од хидроциклонот треба да се исуши до влажност од 5 % со регулирање на влезната температура, излезната температура и протокот на суспензија. Да се забележат процесните параметри, при што се добива посочената влажност на продуктот.

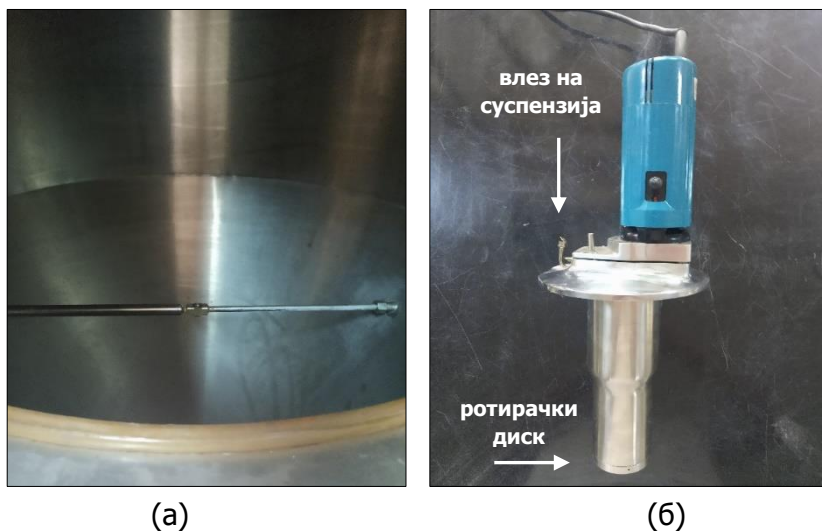
Аероциклонот (слика 58) може да биде и само како дел од посложена апаратура, која извршува и други функции, како што се сушење на суспензии, грануирање, сепарирање итн. Таквата апаратура (слика 58) се состои од повеќе елементи: цилиндрично тело со конусно дно, хоризонтален ротирачки диск (со брзина до 20000 вртежи во минута), вертикална влезна цевка за довод на суспензијата до дискот, излезна цевка од конусното дно до аероциклонот, аероциклон, излезна цевка за најситната фракција или воздух без честички, собирен сад (бункер) за прашкастата сува материја, вреќест филтер на излезната цевка за најситни честички, вентилатор со грејач на влез во телото на постројката, влезен и излезен термометар за контрола на температурата, хоризонтално поставена цевка во централниот дел на постројката со централно поставена дизна (слика 59-а) и компресор за внесување суспензија под притисок до дизната.



**Слика 58.** Апаратура ANHYDRO



Доколку суспензијата се внесува преку ротирачки диск (слика 59-б), тогаш капките кои содржат и минерални зрна со соодветен опсег на димензии (внесени од горната страна до централниот сегмент на дискот), поминуваат спирален хоризонтален пат (од центарот кон периферијата на дискот), при што водата на соодветно високата влезна температура испарува, а минералните зрна како исушени го напуштаат дискот под дејство на центрифугалната сила и воедно се наоѓаат во централиот дел од телото на постројката. Поради воздушното струење под соодветен внатрешен притисок во постројката сега аеросуспензијата излегува од долниот конусен дел и тангенцијално влегува во аероциклонот. Патот кој го поминуваат минералните честички и динамиката во аероциклонот се идентични со хидроциклонот, со таа разлика што овде флуидот е воздух. Покрупните честички (ако се работи за сепарација) излегуваат од дното на аероциклонот и се задржуваат во бункерот, а поситните со воздушната струја излегуваат вертикално нагоре низ централниот сегмент од аероциклонот и се задржуваат во вреќест филтер. Ако се работи за процес на сушење и гранулирање, тогаш скоро целиот материјал се одвојува во бункерот, а излегува само воздух со минимални остатоци од најситните минерални зрна, кои накнадно може да се отстранат во следен стадиум на отпрашување.



**Слика 59.** Влез на суспензија  
(а) преку диза и (б) преку ротирачки диск

### 3.5. ФЛОТАЦИСКА КОНЦЕНТРАЦИЈА

Флотациската концентрација (или само флотација) е често применувана метода за концентрација (сепарација) на ситнозрни минерални суровини. Флотацијата се применува за збогатување на цела низа минерали: метални сулфиди (бакар, олово, цинк, пирит, арсен, жива, злато и др.), оксидни минерали на железо, бакар, олово, потоа карбонати, силикати и многу други. Таа има потенцијално широка намена со употреба на разни флотациони реагенси.

Се базира на различните површински физичко-хемиски особини на минералните зрна. Разликата во површинските особини се однесува на тоа дали минералното зрно е хидрофилно или хидрофобно. Доколку мешавина од такви минерални зрна се потопи во вода и се вдувува гасна фаза во вид на воздушни меурчиња, хидрофобните зрна ќе се прилепат за меурчето воздух и заедно со него ќе испливаат на површината. Притоа на површината ќе се создаде минерализирана пена која како прелив се отстранува. Хидрофилните, пак, ќе се накиснат и како талог ќе останат на дното. Иако во литературата доминантно се среќава корисните минерали да се издвојуваат со минерализираната пена (како корисен концентрат), тоа веќе е надминато, па така, посебно кај неметалните суровини, корисен концентрат може да биде и талогот.

Најчесто во пракса флотацијата се повторува неколку пати, односно минерализираната пена и талогот се флотираат повеќекратно со цел да се издвои што поголемо количество од соодветните минерали. При сепарација на неколку различни компоненти може да се примени и повеќестепенa флотација. Најпрво се одделува една од компонентите, а потоа остатокот (примарно добиен концентрат со повеќе компоненти) оди повторно на флотација за дополнителна сепарација на останатите компоненти со соодветни реагенси. Кога се одделуваат повеќе минерали заедно во еден концентрат се зборува за колективна флотација, а кога се одделуваат минерали еден од друг во засебни концентрати се зборува за селективна флотација.

Одвојувањето на различните минерали во посебни концентрати се изведува во специјално конструирани флотациони концентратори, кои се состојат од една или повеќе комори (флотациони ќелии). Во секоја комора доаѓа до сепарација на минерализирана пена, за релативно кратко време (5 – 15 min.).

Процесот на флотација може да се подели на неколку степени:

I степен: подготовка на суровината – дробење и мелење на суровината до определена гранулација заради отворање и намалување на димензиите на зрната;

II степен: подготовка на пулпа со соодветни карактеристики;

III степен: додавање на флотациони реагенси – колектори, регулатори и пенливци кои ја овозможуваат ефикасноста на процесот;

IV степен: аерирање на пулпата – вдувување на гасна фаза (воздушни меурчиња), кои ги прилепуваат за себе хидрофобните минерални зрна;

V степен: левитација – транспорт на новосоздадените комплекси (воздушно меурче со хидрофобно минерално зрно) на површината на пулпата, создавајќи притоа минерализирана пена;

VI степен: отстранување на минерализираната пена и талогот од флотациониот апарат и нивно дополнително промивање.

Флотационата пулпа претставува грубо дисперзен систем составен од три фази: цврста – минералните зрна, течна – вода и гасна – воздушни меурчиња. Густината на пулпата има големо влијание врз процесот на флотација. Во пракса не треба да се надминува 35 – 45 % цврста материја. При флотација на неметални суровини пулпата е поретка и содржи околу 10 – 12 % цврста материја. Пулпа составена од покрупни минерални зрна е потребно да има поголема густина во однос на пулпа со поситни минерални зрна заради полесно одржување на крупните зрна во неа. При кондиционирање и грубо флотирање е потребна погуста пулпа, а при пречистување е потребна поразредена пулпа. Импелерните флотациони концентратори работат со погуста пулпа, а за пневматските е потребна поретка пулпа, бидејќи степенот на аерација зависи од густината. Порастот на температурата го интензивира процесот на флотација. Повисоката температура го зголемува степенот на хомогеност на пулпата и ја подобрува дисперзијата на флотационите реагенси. Во индустриски услови ретко се контролира температурата на водата, но при флотација на некои специфични суровини температурата на пулпата може да достигне и до 80 °C. Температурата на пулпата се зголемува со вдувување на прегреана пара.

Гасната фаза најчесто е атмосферски воздух. Оптималната димензија на воздушните меури изнесува 0,1 – 1,5 mm. Составот на гасот има минорно значење при создавањето на комплексите помеѓу гасното меурче и минералното зрно, освен доколку не стапува во реакција со минералните зрна. Кислородот кој се содржи во воздухот може да предизвика оксидација на некои сулфидни минерали; CO<sub>2</sub> од воздухот може да доведе до таложeње на карбонати (CaCO<sub>3</sub>); SO<sub>2</sub> може да создаде сулфати; H<sub>2</sub>S може да таложува тешко растворливи сулфиди итн. Исто така, растворената гасна фаза ја пореметува и концентрацијата на водородни јони во водата.

Течната фаза најчесто е вода, односно воден раствор со најразлични јони и молекули кои во себе ги содржи индустриската вода. Водата може да ги раствори супстанциите, да ги јонизира и да создаде хидрати. Меѓутоа, важно е да се нагласи дека сите супстанции при растворање во вода не јонизираат (дисоцираат). Хидратизираните јони ги обложуваат минералните зрна, со што ја менуваат нивната способност за накупување. Воздухот и најголем дел од органските соединенија во вода се раствораат молекуларно. Теоретски гледано кај чистата вода  $pH = 7$ . Меѓутоа, поради тоа што водата е одличен растворувач,  $pH$  најчесто има некоја друга вредност зависно од растворените компоненти во минимални количини. Растворениот CO<sub>2</sub> од воздухот, исто така, минимално ја намалува  $pH$  вредноста на водата.

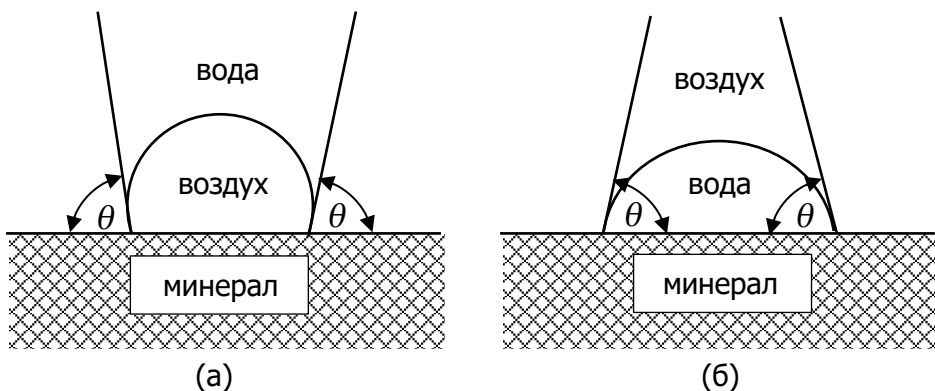
Цврстата фаза ја сочинуваат минералните сировини кои се внесени во системот. Минералните сировини имаат хетероген минералшки состав. Составени се од различни минерали кои имаат различни особини. Сулфидните минерали имаат повисока специфична маса и поседуваат изразени флотациски особини. Оксидните руди, пак, имаат послабо изразени флотациски особини. Исто така, минералните зрна имаат и хетероген гранулометрички состав. За ефикасна флотација потребната димензија на зрната варира за различни минерални сировини. За флотација на неметални сировини и рудни минерали димензијата на зрната треба да биде до 0,2 mm. За флотација на јаглен и графит димензијата на зрната варира од 0,5 mm до 1 mm.

Минералните сировини со јонска врска лесно дисоцираат и се хидрофилни, како резултат на интеракцијата со поларните молекули на водата. Силикатите и минералите кои во својот состав содржат кислород (оксиди, карбонати, сулфати, фосфати итн.), поради афинитетот на кислородот кон водата и нивната кристална структура се хидрофилни. Сулфидите на тешките метали и покрај јонската

врска не се хидрофилни поради слабиот афинитет кон водата. Меѓутоа, доколку дојде до оксидација на нивната површина, тие стануваат хидрофилни. Исто така, како цврста фаза во системот се внесуваат и примеси како онечистувања од процесот на отворање на суровините поради абење на машините (дробилки и мелници). Не треба да се занемарат и останатите подготвителни операции, бидејќи воздухот и водата влијаат на минералните зрна, односно доаѓа до одреден степен на оксидација на површината.

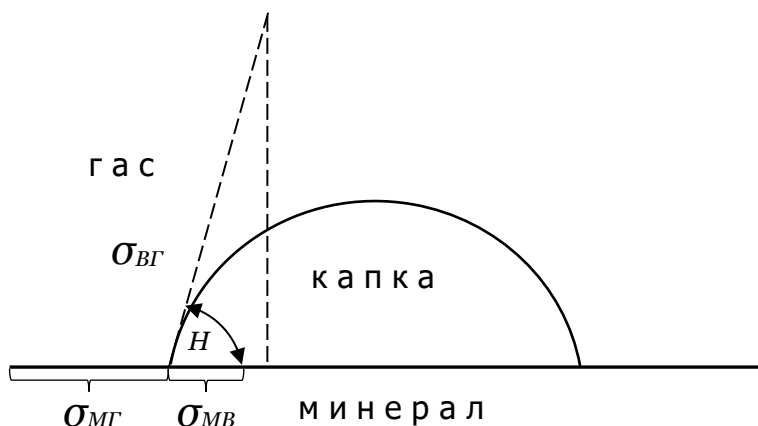
При процесот на флотација хидрофобните зрна се прилепуваат за меурчињата воздух и заедно со нив испливуваат на површината. Интеракцијата помеѓу минералното зрно и воздушното меурче ќе зависи од површинскиот напон на границата вода-воздух, како и површинските напони помеѓу цврстата и течната, односно цврстата и гасовитата фаза. Доколку при оваа интеракција водата делумно го ослободи минералното зрно, на неговата површина се формира одредена кружна линија на контактот на трите фази.

Тангентата повлечена низ која било точка од оваа кружна линија на страните од цврстата и гасната фаза зафаќа одреден агол на контакт  $\theta$ . Овој агол на контакт е карактеристична големина за одредување на степенот на киснење. При потполно киснење аголот на контакт  $\theta = 0^\circ$ , а при тотално некиснење  $\theta = 180^\circ$ .



**Слика 60.** Агол на контакт на меѓуфазна граница  
(а) помеѓу минерално зрно и воздушен меур;  
(б) помеѓу минерално зрно и капка вода

Во состојба на рамнотежа напоните на граничните површини се компензираат помеѓу себе.



**Слика 61.** Зависност на аголот на контакт  $\theta$  од меѓуфазните напони

Аголот на контакт се определува од изразот:

$$\sigma_{МГ} - \sigma_{МВ} = \sigma_{ВГ} \cdot \cos \theta$$

каде е:

$\sigma_{МГ}$  – меѓуфазен напон помеѓу минералното зрно и гасната фаза;

$\sigma_{МВ}$  – меѓуфазен напон помеѓу минералното зрно и водата;

$\sigma_{ВГ}$  – меѓуфазен напон помеѓу водата и гасната фаза.

Со оглед на тоа дека само мал број минерали природно располагаат со хидрофобни особини, во пулпата се внесуваат и реагенси кои селективно дејствуваат на површината на минералното зрно со цел да создадат (според потреба) хидрофилни или хидрофобни особини. Флотационите реагенси се делат во три групи:

- колектори,
- модификатори,
- пенливци.

Колекторите се органски соединенија кои имаат задача селективно да дејствуваат на површината на минералните зрна и да се концентрираат на меѓуфазната граница цврсто – течно. Притоа вршат хидрофобизација на површината на зрното. Колекторите може да бидат јонски и нејонски. Доминантно се применуваат јонските колектори кои се делат на анјонски и катјонски. Анјонските колектори се користат за метални сировини, а катјонските повеќе за неметални сировини. Како анјонски колектори се применуваат карбоксилатни, алкил сулфатни, сулфонатни и сулфхидрилни

колектори. Катјонските колектори се класифицирани во две групи на органски соединенија, амини и нивните соли, како и квартернерни амониумови соли.

За флотација на скоро сите сулфидни минерали на железото и обоените метали се применуваат сулфхидрилните колектори. Тоа се органски соединенија кои во својот состав содржат сулфхидрилна група (SH)<sup>-</sup>. Како сулфхидрилни колектори се применуваат соединенијата во кои водородот е заменет со алкален метал, натриум или калиум. Калиумовите и натриумовите соли на сулфхидрилните соединенија во вода дисоцираат, создавајќи метален катјон и анјон, хетерополарен јон на колекторот. Како сулфхидрилни колектори доминантно се применуваат ксантатите и дитиофосфатите.

Модификаторите се реагенси кои ја регулираат *pH* вредноста на пулпата. Исто така, тие активираат, односно депримираат одредени видови на минерални зрна во процесот, со што овозможуваат селективна флотација. Поделени се во три групи: регулатори на *pH*, депресори и активатори.

Регулаторите се, пред сè, донори на H<sup>+</sup> или OH<sup>-</sup> јони со што ја обезбедуваат потребната киселост, односно базност на пулпата. Точно регулираната *pH* вредност на пулпата го зголемува степенот на ефикасност на процесот на флотација. Со регулирање на *pH* на пулпата се создаваат погодни услови за флотирање на едни минерали, односно непогодни услови за други минерали. Како регулатори на *pH* на пулпа доминантно се применуваат неоргански соединенија од типот на киселини, бази и соли (сулфурна киселина, флуороводородна киселина, натриум хидроксид, бакар сулфат, водено стакло, натриум карбонат и други).

Активаторите се помошни реагенси кои ја активираат површина на минералното зрно, со што овозможуваат полесен контакт со колекторот, а со цел зрното да ги интензивира хидрофобните својства. Активаторите најчесто се неоргански соединенија, иако постојат и органски активатори. Тоа се електролити кои дисоцираат во вода и се инкорпорираат во кристалната решетка на минералот кој се активира – јон активатор (најчесто катјон). Во согласност со тоа, при флотација со анјонски колектори, во својство на активатори се употребуваат катјоните на Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> и други. При флотација со катјонски колектори како активатори се употребуваат анјоните на F<sup>-</sup>, SiF<sub>6</sub><sup>2-</sup>, S<sup>2-</sup> и други. Во пракса, при флотација како активатори доминантно се употребуваат: CuSO<sub>4</sub> · 5 H<sub>2</sub>O, FeSO<sub>4</sub> · 7 H<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HF и други.

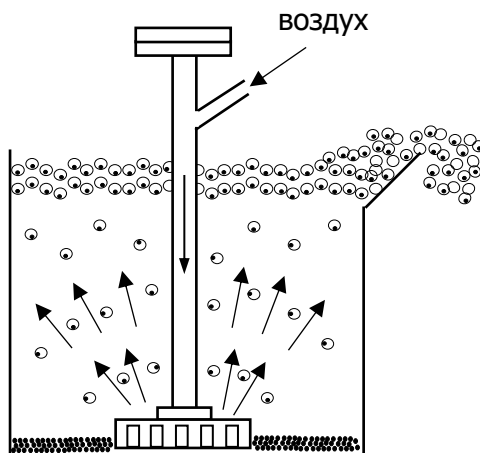
Депресорите (деприматори) ја зголемуваат хидрофилноста на минералните зрна. Механизмот на дејството на депресорите е во спречување на интеракцијата помеѓу колекторот и минералното зрно, преку создавање хидрофилен слој, или со разорување на адсорбираните филмови од колектор врз површината на минералното зрно. Депресорите може да се од неорганско и органско потекло. Како депресори се употребуваат бази  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , цијаниди ( $\text{KCN}$ ,  $\text{NaCN}$ ),  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , водено стакло, штирак, декстрин, и други.

Пенливците се концентрираат на граница на фаза вода-воздух и имаат задача воздушните меурчиња да ги одржуваат диспергирани во пулпата (да не се соединуваат). По испливување на површина пенливците оневозможуваат брзо распрскување на воздушните меурчиња, така што се формира стабилна пена. Како пенливци се применуваат површинско активни супстанции. Пенливците во својот состав ги имаат следните поларни групи: хидроксилна група  $-\text{OH}$ , карбоксилна група  $-\text{COOH}$ , карбонилна група  $=\text{CO}$ , аминоксидна група  $-\text{NH}_2$ , сулфо група  $-\text{SO}_3\text{H}$  и други. Во пенливци спаѓаат: борово масло, масни киселини, терпентол, дизел-масло и друго. Поради изразеното селективно дејство се применуваат и синтетски пенливци. Дозирањето пенливец, исто така, игра голема улога, бидејќи преголемо количество пенливец создава цврста пена, која потоа тешко се преработува, а премало количество не може да формира стабилна пена. Честа е и појавата при флотација да се комбинираат повеќе типови на пенливци.

Треба да се напомене дека редоследот и дозирањето на реагенсите (реагенсен режим) и времетраењето на флотацијата се дефинираат зависно од видот на сировината (минералите). Најчесто се дефинираат експериментално, во лабораториски услови.

Влијание врз процесот на флотација има и флотационата ќелија. Притоа, доминантен фактор претставува начинот на аерација на пулпата. Флотационите ќелии, според конструкционото решение, се делат на импелерни и пневматски. Разликата помеѓу импелерните и пневматските е во начинот на создавање на воздушната струја. Кај импелерните флотациони ќелии воздушната струја се диспергира на меурчиња во зоната помеѓу роторот и статорот. Кај пневматските флотациони ќелии воздухот се вдувува под притисок низ порозен медиум кој е сместен минимално над дното во ќелијата. Притоа кај импелерните флотациони ќелии воздушните меури се со помали димензии, односно од 0,1 до 1,4 mm (претежно од 0,4 до 0,8 mm). Кај пневматските флотациони ќелии воздушните меури се со поголеми димензии (од 2 до 4 mm).





**Слика 62.** Шема на флотациона ќелија

Во пракса никогаш не се користи само една флотациона ќелија, туку поголем број поврзани во низа. Со тоа се овозможува повеќекратна флотација и подобро искористување на суровината. Времето на кондиционирање и флотирање е различно за разни минерали, но најчесто се движи во граници од 5 до 15 min. По завршувањето на флотација добиените концентрати се промиваат, се декантираат и се сушат.

### Лабораториска вежба

За изведување на флотацијата е потребно да се има соодветно подготвен материјал (дробен и мелен до максимално отворање на минералните зрна и класиран во соодветни димензии фракции на зрна) со претходно определен хемиски и минералоски состав. Затоа се подготвува материјал, кој претставува мешавина од калиумов фелдспат околу 60 %, кварц околу 30 % и железоносни минерали околу 10 %. Целта на лабораториската вежба е да се сепарираат железоносните минерали од фелдспатот и кварцот со првостепена флотација. Потоа со второстепена флотација да се добијат засебни концентрати на фелдспат и кварц.

Подготвениот материјал се суши во сушара до константна маса. Потоа се одмеруваат на техничка вага околу 200 – 300 g од материјалот и се ставаат во флотациона ќелија (слика 63). Се додаваат околу 2 l вода за да се добие суспензија со погодна густина (уделот на цврста маса во пулпата треба да изнесува 10 – 12 %).



**Слика 63.** Флотациона машина

Потоа се додаваат соодветни реагенси за првостепената флотација. За потенцирање на хидрофобните особини на железонските минерали се додава колектор на база на ксантати познат под трговското име Aero Xanthate 322. Се додава околу  $1 \text{ cm}^3$  (10 % воден раствор), така што концентрацијата на колекторот во пулпата изнесува околу 50 g/t (индустриски услови). Како регулатор на средина и како депресор на фелдспат и кварц се користи 10 % раствор на сулфурна киселина ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), при што  $pH$  на пулпата треба да изнесува  $pH \approx 3$  (се додава околу  $1 \text{ cm}^3$ ). Како пенливец се додава Dowfroth 250 (на база на полипропилен гликол метил етер), околу  $1 \text{ cm}^3$ .

Потоа машината се вклучува, без да се пушти проток на воздух, при определен број на вртежи на импелерот (900 – 1200 во минута). На тој начин со кондиционирањето се врши хомогенизација на системот и се овозможува рамномерно распределување на активните хемикалии на површината на сите минерални зрна. По околу 2 min се дополнува флотационата ќелија со вода и се отвора вентилот за воздух. Создадената пена, во која се наоѓаат железонските минерали (како хидрофобни тие се прилепени на воздушните меурчиња), се отстранува од флотационата ќелија, се декантира, се промива и се суши.

Талогот од флотационата ќелија (концентрат од фелдспат и кварц) се декантира и на сито се промива, за да се отстранат присутните реагенси. Потоа се враќа во флотационата ќелија, повторно се додава истата количина на вода (околу 2 l), како и соодветните хемиски флотациони реагенси. Како колектор се додава катјонски амин познат под трговското име Aeromine 3037. Се додаваат околу 2 cm<sup>3</sup> (10 % воден раствор), за концентрацијата на активната компонента во пулпата да изнесува околу 100 g/t. За регулирање на pH на пулпата (треба да изнесува околу pH ≈ 2,5) се додава 1 cm<sup>3</sup> 10 % раствор на флуороводородна киселина HF. Како пенливец се додава Dowfroth 250 околу 1 cm<sup>3</sup>.

Како што се гледа, потрошувачката на хемиските флотациони реагенси е минимална во однос на вкупната маса во системот. Се повторува постапката за кондиционирање, потоа се отвора вентилот за воздух и се отстранува создадената пена во која се содржани зрната на фелдспатот. Зрната на кварцот остануваат во талогот.

Се декантираат добиените концентрати, се промиваат и се сушат. По сушењето се мерат приносите од концентратите заради пресметка на материјалниот биланс. Добиените резултати се презентираат табеларно.

**Табела 2.** Пример за материјален биланс за процесот на фотација

| Компонента | Масен удел (%) |
|------------|----------------|
| Пирит      | 10,00          |
| Фелдспат   | 60,00          |
| Кварц      | 30,00          |
| Вкупно     | 100,00         |

На крај, концентратите од флотацијата се прегледуваат со помош на бинокуларен микроскоп и се врши опис на зрната, како и проценка на ефективноста на процесот.

### 3.6. МАГНЕТНА КОНЦЕНТРАЦИЈА

Магнетната концентрација е една од методите кои се користат за сепарација на минералите по вид. Како метода, најмногу се користи за концентрирање магнетни руди, за пречистување кварцни песоци, керамички суровини, одделување на секундарно внесени железни нечистотии (при отворање на суровината) и др. Се базира на нивното различно однесување во магнетно поле, односно на разликата на susceptibilноста и permeabilноста на минералите. При движење на смеса од минерални зрна во работната зона (магнетното поле) на магнетните сепаратори, минералните зрна кои имаат магнетни особини се привлекуваат и се концентрираат како магнетна фракција, а останатите минерални зрна се сепарираат како немагнетна фракција.

Врз ефикасноста на магнетната сепарација влијаат и други фактори како специфичната маса, димензијата на минералните зрна и присуството на примеси. Присуството на примеси има влијание и може да ја промени магнетната permeabilност. Покрај силите на магнетното поле, кои имаат примарно дејство и врз чие дејство се врши сепарацијата, во системот дејствуваат и помошни сили како гравитациона, центрифугална и други.

Во однос на магнетната permeabilност, минералите се класифицираат на парамагнетни и дијамагнетни, во зависност од тоа дали се повеќе или помалку permeabilни во однос на просторот во магнетното поле. Доколку permeabilноста на зрното минерал е поголема од permeabilноста на воздухот ( $\mu = 1$ ), зрното ќе биде привлечено кон магнетните полови, при што минералот се смета за парамагнетен. Во спротивно, минералот се смета за дијамагнетен.

Поконкретна класификација е поделбата на минералите врз база на нивното однесување во магнетно поле:

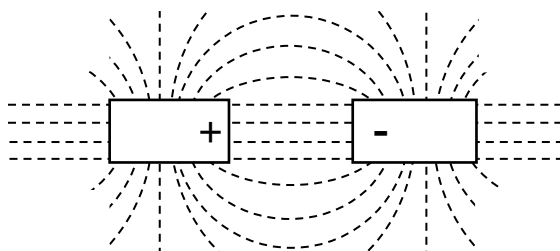
- силно магнетни, спаѓаат железо и некои железни минерали;
- слабо магнетни, каде главно спаѓаат железни минерали;
- немагнетни, најголема група на неметални минерали.

Во табела 3 е презентирана класификација на минералите според релативната привлечност. Наведената поделба се однесува на чисти минерали, што во пракса е реткост, имајќи на знаење дека најголем број на отворени минерални зрна се помалку или повеќе онечистени од примеси.

**Табела 3.** Релативна привлечност на некои минерали

|                | Минерал     | Релативна привлечност |
|----------------|-------------|-----------------------|
| Силно магнетни | Железо      | 100,00                |
|                | Магнетит    | 40,18                 |
|                | Франклинит  | 35,38                 |
|                | Илменит     | 24,70                 |
| Слабо магнетни | Пинхотин    | 6,69                  |
|                | Сидерит     | 1,82                  |
|                | Хематит     | 1,32                  |
|                | Циркон      | 1,01                  |
|                | Лимонит     | 0,84                  |
|                | Корунд      | 0,89                  |
|                | Пиролузит   | 0,71                  |
| Немагнетни     | Манганит    | 0,52                  |
|                | Кварц       | 0,37                  |
|                | Пирит       | 0,23                  |
|                | Сфалерит    | 0,23                  |
|                | Молибденит  | 0,23                  |
|                | Доломит     | 0,22                  |
|                | Борнит      | 0,22                  |
|                | Апатит      | 0,21                  |
|                | Талк        | 0,15                  |
|                | Арсенопирит | 0,15                  |
|                | Магнезит    | 0,15                  |
|                | Халкопирит  | 0,14                  |
|                | Гипс        | 0,12                  |
|                | Флуорит     | 0,11                  |
|                | Цинкит      | 0,10                  |
|                | Халкозин    | 0,09                  |
|                | Куприт      | 0,08                  |
|                | Смитсонит   | 0,07                  |
|                | Ортоклас    | 0,05                  |
|                | Криолит     | 0,05                  |
| Галенит        | 0,04        |                       |
| Калцит         | 0,03        |                       |
| Витерит        | 0,02        |                       |

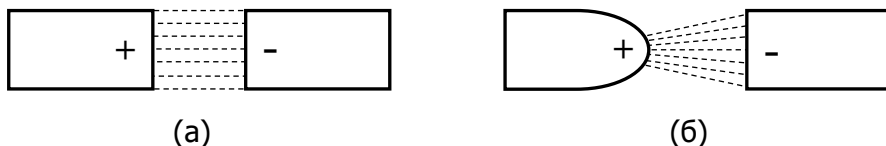
Магнетно поле е просторот каде дејствуваат магнетните сили.



**Слика 64.** Магнетно поле

Основна карактеристика на магнетното поле во дадена точка е магнетната индукција, која претставува број на магнетни сили (силони линии) кои минуваат низ единица површина на полето, и е векторска големина. Индукцијата на магнетните сили низ некоја материја внесена во магнетното поле се нарекува јачина (интензитет) на магнетното поле. Според интензитетот на магнетното поле во различни точки, тоа може да биде хомогено или нехомогено.

Магнетните сили помеѓу половите можат да се распростираат на повеќе начини. Затоа на магнетните полови се задава таква форма магнетните сили да конвергираат кон еден од половите, при што еден пол се заострува (под агол од 45 до 90°). На тој начин се згуснуваат магнетните сили, па резултатата на движење на зрното ќе биде спрема заострениот пол, т.е. во правец на згуснатите магнетни сили. Поради различната густина на силите, парамагнетното минерално зрно ќе се движи (ќе биде привлечено) во насоката каде што магнетните сили (силони линии) се најгусти.



**Слика 65.** Магнетно поле со два рамни пола (а),  
и со еден заоблен пол (б)

Во магнетното поле, под влијание на магнетните сили кои дејствуваат помеѓу два магнетни пола, некои минерални зрна ќе го променат првобитното основно движење и ќе се упатат кон еден од половите, а некои непречено ќе го продолжат своето првобитно основно движење зависно од магнетните особини на минералот.

Притоа, колку магнетните особини се поизразени, толку ќе биде поголемо и отстапувањето од основното движење, односно приближувањето кон половите.

Доколку зрното се наоѓа во хомогено магнетно поле, магнетните сили подеднакво дејствуваат на зрното и тоа нема да се помести. Јачината на магнетното поле зависи од растојанието помеѓу половите. Доколку растојанието е поголемо, дотолку поизразено дивергираат магнетните сили, при што се намалува нивното дејство. Затоа, за да се добие потребната магнетомоторна сила, потребно е растојанието да биде минимално, односно само толку колку да можат да поминат минералните зрна. Затоа, при конструкција на магнетните сепаратори половите се поставуваат блиску еден до друг, на минимално растојание, кое ќе овозможи непречно движење на минералните зрна. Исто така, траекторијата на минералните зрна треба да е што поблиску до конвергентниот пол. Во спротивно, потребно е да се зголеми напонот и интензитетот на струјата.

Доколку минералното зрно во магнетното поле се претстави како точка, магнетната сила ( $F$ ) која дејствува според Куломбововиот закон е:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{\mu \cdot r^2}$$

каде е:

$q_1$  и  $q_2$  – количество на електричен полнеж;

$\mu$  – магнетен пермеабилитет на средината;

$r$  – растојание помеѓу половите.

Енергијата во магнетното поле може да се претстави како потенцијална енергија способна да изврши работа. Транспортирајќи го минералното зрно за некое растојание  $dl$ , магнетната енергија е намалена за  $dW$  во однос на почетната состојба. Притоа е извршена работа спротивно на силата  $F$  која дејствува на минералното зрно.

$$F \cdot dl = - dW$$

односно:

$$F = - \frac{dW}{dl}$$

Земајќи предвид дека пермеабилитетот е константен во дадениот систем, силата  $F_x$  која дејствува на минералното зрно може да се изрази како:

$$F_x = P_m \frac{\partial A}{\partial x} - \frac{\mu - 1}{4 \cdot \pi} \cdot H \frac{\partial H}{\partial x}$$

каде е:

$A$  – магнетен потенцијал;

$H$  – интензитет на магнетното поле;

$\mu$  – магнетен пермеабилитет на материјалот;

$x$  – растојание;

$P_m$  – специфична маса на материјалот од кој е направен магнетот.

Магнетните сепаратори се разликуваат по начинот на искористување на магнетните сили, како и по траекторијата на движењето на минералното зрно во зоната на сепарација. Според движењето на минералното зрно, магнетните сепаратори се делат на сепаратори кај кои минералните зрна паѓаат вертикално надолу, и на сепаратори кај кои зрната се движат по релативно хоризонтална основа. Секогаш мора да биде обезбеден слободен проток на материјалот низ сепараторот.

Технички гледано, магнетните сепаратори помеѓу себе се разликуваат и по интензитетот на магнетното поле (ниско и високо интензитетни). За конструкција на магнетни сепаратори може да се користат перманентни магнети, но најчесто се користат електромагнети, со чија примена може да се добие магнетно поле со голем интензитет, а со тоа се овозможува сепарација на послабо магнетни примеси.

Според начинот на работа, магнетните сепаратори можат да бидат суви или мокри, односно сепарацијата да се врши во струја на воздух или во облик на водена суспензија. Првите се користат за растресити, релативно покрупно зрнести материјали, а вторите за поситни материјали.

За магнетна концентрација, каде ќе се сепарираат чисти минерали или минерали со иста суспензибилност, се користат изодинамички магнетни сепаратори. Тоа се овозможува со промена на интензитетот на струјата, со што се регулира и степенот на јачина на магнетното поле, а со тоа и видот на издвоените минерали.

Степенот на ефикасност на магнетната концентрација може да се подобри не само со технички решенија на самите сепаратори, туку и со менување на особините на самите минерали, посебно кога се



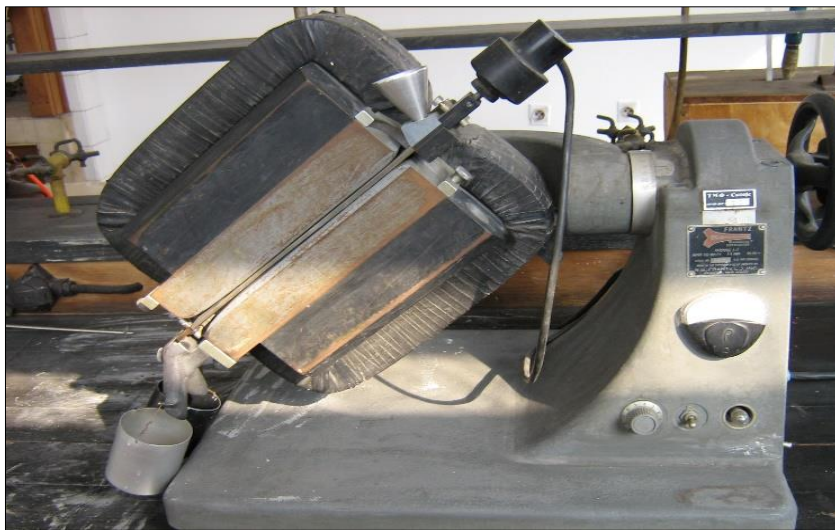
работи за железоносни минерали. На пример, со пржење на некои железоносни минерали (пирит, хематит, лимонит, сидерит и др.), се врши оксидација на железото, се преведуваат во феромагнетни минерали, односно магнетит  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . До кој степен ќе биде трансформацијата, односно дали ќе биде потполна или само површинска ќе зависи од атмосферата (оксидациона, редуциона или неутрална), температурата и димензијата на зрната при пржењето. На тој начин се потенцираат магнетните особини, а истовремено се отстранува присутната хидратна вода.

Спротивно на тоа, многу често, по завршена магнетна концентрација дел од минералите остануваат намагнетизирани, што претставува пречка за понатамошното користење на концентратот. Затоа мора да се изврши демагнетизација, што се постигнува со пропуштање на материјалот низ демагнетизатор, односно железна цевка околу која степенесто е намотан електроспроводник низ кој тече наизменична струја. Така се создава променливо магнетно поле во кое се врши демагнетизација на минералите.

### Лабораториска вежба

Магнетната концентрација се реализира со примена на електромагнети, чијашто изведба е различна (нискоинтензитетни, високоинтензитетни, изодинамички, суви, мокри итн.). Во лабораториски услови се применува Францов изодинамички магнетен сепаратор со електромагнет (слика 66). Магнетниот сепаратор може да се користи повеќенаменски: како нискоинтензитетен, како високоинтензитетен, одделувањето да се врши во релативно збиен тек на зрна под различни агли (по вертикала и хоризонтала) или во слободен пад во флуид – воздух (каде што зрната се движат слободно под влијание на гравитацијата).

Претходно класиран материјал со димензија на зрна до околу 0,5 mm се суши во сушара на температура од 105 °C до константна маса. Од него се мери приближно околу 10 g. Потоа се дефинираат работните услови на магнетниот сепаратор. Се дефинира јачината на магнетното поле (преку интензитетот на струјата), како и нагибот (вертикален и хоризонтален) со кој се дефинира движењето на минералните зрна. Обично се врши повеќестепена магнетна сепарација, со тоа што се започнува со послабо магнетно поле, односно со понизок интензитет на струја (потенциометарот се поставува на околу 0,5 A).



**Слика 66.** Францов изодинамички магнетен концентратор

При вакви услови се сепарираат минералите (зрната) со најсилно изразени магнетни особини. Како продукт се добиваат два концентрати: магнетен и немагнетен. Потоа при второстепената магнетна сепарација немагнетниот концентрат се пропушта низ магнетниот сепаратор, но сега низ појако магнетно поле при повисок интензитет на струја (околу 1,9 A). Добиениот краен продукт е еден немагнетен концентрат и два магнетни концентрати. Тие се мерат и се пакуваат со правилно обележување. Се прави материјален биланс, при што масените удели на немагнетниот и двата магнетни концентрати се претставуваат табеларно.

**Табела 4.** Пример за материјален биланс на магнетна концентрација

| Компонента            | Маса (g) | Масен удел (%) |
|-----------------------|----------|----------------|
| Немагнетен концентрат | 8,15     | 81,50          |
| Магнетен концентрат 1 | 1,25     | 12,50          |
| Магнетен концентрат 2 | 0,60     | 6,00           |
| Вкупно                | 10,00    | 100,00         |

На крај, концентратите од магнетната сепарација се прегледуваат со помош на бинокуларен микроскоп и се врши опис на зрната од различните концентрати, како и проценка на ефикасноста на процесот.

## 4. ЛИТЕРАТУРА

1. Николовски, М., Подготовка на минерални сировини, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје, 1995;
2. Кнежевић, Д., Припрема минералних сировина, Рударско-геолошки факултет Универзитета у Београду, 2001;
3. Lešić, Đ., Marković, S., Priprema mineralnih surovina, Građevinska knjiga, Beograd, 1968;
4. Wills, A.B., Napier-Munn, T., Mineral Processing Technology, 7<sup>th</sup> Edition, Elsevier Science & Technology Books, 2006;
5. Gupta, A., Yan, D.S., Mineral Processing Design and Operations, Elsevier, 2006;
6. Зафировски, С., Павловски, Б., Сапунов, П., Прирачник за неметални сировини и производи со методи за нивно испитување, Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Скопје, 1974;
7. Tomanec, A.R., Metode ispitivanja mineralnih surovina u pripremi mineralnih surovina, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, 2000;
8. Izvonar, D., Instrumentalne metode u keramici, Viša tehnološka škola za nemetale, Arandjelovac, 2000;

ISBN 978-9989-650-10-9



9 789989 650109