



ПРОФ. Д-Р АЛЕКСАНДАР ДИМИТРОВ

ВОВЕД ВО МЕТАЛУРГИЈА

СКОПЈЕ 2026

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје



ВОВЕД ВО МЕТАЛУРГИЈА

Александар Димитров

Скопје 2026

Издавач:

„Св. Кирил и Методиј“ во Скопје
Бул. „Гоце Делчев“ бр. 9, 1000 Скопје
www.ukim.edu.mk

Уредник на издавачка дејност на УКИМ:

Проф. д-р Биљана Ангелова, ректор

Уредник на публикацијата:

Александар Димитров, Технолошко-металуршки факултет – Скопје

Рецензенти:

1. Проф. д-р Перица Пауновиќ
2. Проф. д-р Ана Томова

Техничка обработка:

Александар Димитров

Лектура на македонски јазик:

Ивана Слободан Коцевска

Илустратор:

Александар Димитров

CIP - Каталогизација во публикација
Национална и универзитетска библиотека "Св. Климент Охридски", Скопје
669(075.8)

ДИМИТРОВ, Александар

Вовед во металургија [Електронски извор] / Александар Димитров ;
[илустратор Александар Димитров]. - Скопје : Универзитет "Св. Кирил и
Методиј", 2026

Начин на пристапување (URL): <https://ukim.edu.mk/e-book/00163>. - Текст
во PDF формат, содржи 350 стр., илустр. - Наслов преземен од екранот. -
Опис на изворот на ден 09.02.2026. - Слика и белешка за авторот. -
Толковник на стручни металуршки изрази: стр. 338-340. - Библиографија:
стр. 333-335

ISBN 978-9989-43-549-2

а) Металургија -- Високошколски учебници

COBISS.MK-ID 68099333

ВОВЕД ВО МЕТАЛУРГИЈА



Проф. д-р Александар Димитров (1958, Кавадарци) е редовен професор на Технолошко-металуршкиот факултет при Универзитетот „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје и реномиран научник во областа на екстрактивната металургија, техничката електрохемија и науката за наноматеријалите. Дипломирал на Металуршкиот факултет во Скопје во 1983 година, а академското звање доктор на технички науки го стекнал во 1997 година.

Академското усовршување го реализирал преку меѓународни истражувачки престои, меѓу кои шестмесечна специјализација на Универзитетот во Лидс како стипендист на British Council и постдокторски студии на University of Cambridge, Department of Materials Science and Metallurgy, финансирани од Royal Society и НАТО.

Кариерата ја започнал во индустрискиот сектор („КУПРУМ“ – Скопје), а од 1988 година е трајно ангажиран во наставно-научната дејност на факултетот, каде напредувал до редовен професор и во периодот 2007–2015 година ја извршувал функцијата декан. Автор е на над 120 научни трудови и носител на меѓународен патент за електролитичка постапка. Активно бил вклучен во работата на професионални здруженија, извршувајќи ја функцијата претседател на Инженерската институција на Македонија и потпретседател на Балканскиот сојуз на металурзите.

СОДРЖИНА

ПРЕДГОВОР	10
Поглавје 1 Основни металуршки процеси.....	14
1.1.Подготовка на суровини.....	20
1.1.1.Без промена на хемискиот состав.....	21
1.1.1.1. Дробење на рудата	21
1.1.1.2. Мелење на рудата.....	27
1.1.1.3. Сеење на рудата	28
1.1.2. Обогадување на минералните суровини	31
1.2.Металуршка подготовка	34
1.2.1. Брикетирање	34
1.2.2. Пелетизирање	36
1.2.2.1.Карактеристики на суровиние за пелетизирање.....	37
1.2.2.2. Уреди за обликување	41
1.2.2.3. Печење на суровите пелети.....	47
1.2.2.4. Оцена на квалитетот на пелетите	55
1.2.2.5. Предности на пелетизацијата.....	57
1.2.2.6. Недостатоци на пелетизацијата.....	58
1.2.3. Агломерација.....	58
1.2.3.1. Суровини за агломерациониот процес.....	60
1.2.3.2. Подготовка на рудите, варовникот и горивото	63
1.2.3.3. Добивање агломерат	65
1.2.3.4. Подготовка на шаржата за агломерирање	66
1.2.3.5. Засипување на шаржата.....	66
1.2.3.6. Запалување на шаржата.....	67
1.2.3.7. Физичко-хемиски процеси.....	67
1.3. Подготовка со промена на хемискиот состав.....	74

1.3.1. Хлоридно пржење	74
1.3.2. Сулфатационо пржење	75
1.3.3. Оксидационо пржење	75
1.3.4. Магнетизирачко пржење	76
1.3.5. Калцинационо пржење	76
1.3.6. Пржење со испарување	77
1.4. Металуршка троска.....	80
1.4.1.Хемиски карактеристики на троската.....	81
1.4.2. Особини на троската.....	84
1.4.3. Процес на образување троска при топење.....	85
1.4. 4. Искористување на троската	88
1.5. Топители	90
1.5.1. Варовник и вар	91
1.5.2. Железни оксиди.....	92
1.5.3. Силициум диоксид.....	92
1.6. Прашања и одговори.....	94
Поглавје 2 Гориво и редуценти	97
2. Улога и значење на горивата во металургијата.....	97
2.1. Хемиски состав на горивото	100
2.2. Хемиска анализа на горивото	101
2.3. Класификација на горивата.....	101
2.4. Топлотна моќ на горивото.....	104
2.5. Цврсти горива.....	105
2.5.1. Д р в о.....	106
2.5.2. Т р е с е т.....	106
2.5.3. Цврсти минерални горива	107
2.5.3.1. Л и г н и т.....	108
2.5.3.2. М р к ј а г л е н.....	109
2.5.3.3. К а м е н ј а г л е н.....	110

2.5.3.4. Антрацит.....	111
2.6. Вештачки цврсти горива	111
2.6.1. Кокс.....	111
2.6.2. Дрвен јаглен (кумур).....	114
2.6.3. Полукокс	116
2.7. Течни горива.....	117
2.7.1. Нафта.....	117
2.7.2. Мазут.....	118
2.8. Гасовити горива	120
2.8.1. Природен гас	121
2.8.2. Генераторски гас.....	121
2.8.3. Коксен гас.....	123
2.8.4. Гас од високи печки.....	123
2.9. Прашања и одговори.....	124
Поглавје 3 Производство на железо во висока печка.....	127
3.1.Суровини.....	130
3.2.Конструкција на висока печка.....	132
3.3.Детален опис на процесите во високата печка.....	134
3.3.2.Пресметки на редукција	134
3.4.Производи	139
3.5.Современи трендови.....	139
3.6.Енергетски и масен биланс	142
3.7.Производство на челик.....	143
3.8.Видови на железо и челик.....	146
3.8.1.Ковано железо	146
3.8.2. Мек челик (нискојаглероден челик).....	146
3.8.3. Високојаглероден челик.....	146
3.8.4. Не’рѓосувачки челик (Stainless steel)	147
3.8.5. Титан челик (Titanium steel).....	147

3.8.6.Мангански челик (Manganese steel).....	147
3.9.Современи трендови во металургијата.....	149
3.9.1 Водород како редуциско средство	149
3.9.2. Интеграција на обновливи извори на енергија	151
3.9.3. Образовно и инженерско значење.....	152
3.9. Прашања и одговори.....	153
3.10. Испитна задача.....	155
Поглавје 4 Производство на бакар	161
4.1. Пирометалургија на бакар.....	164
4.1.1.Руди на бакар.....	166
4.1.2.Концентрација на бакарна руда	170
4.1.2.1. Механизам на флотацијата.....	170
4.1.2.2. Хемиски реагенси во флотациониот процес	171
4.1.2.3. Процесот на формирање пена и одвојување	174
4.1.2.4. Отстранување и повторна обработка на пена.....	175
4.1.3.5. Одвојување и управување со остатокот.....	176
4.1.3.Еколошки и економски аспект.....	176
4.1.4.Пржење.....	177
4.1.4.1. Главни цели на процесот на пржење.....	177
4.1.5. Типови на печки и технолошки аспекти.....	179
4.1.6. Топење (Smelting)	179
4.1.6.1. Редуција на бакарните оксиди	180
4.1.6.2. Формирање на Каменец (каменец).....	181
4.1.7. Фази формирани при топењето	182
4.1.8. Технолошки услови на процесот.....	182
4.1.8.1.Одвојување на фазите и третман на троската.....	183
4.1.9. Конвертирање.....	184

4.1.9.1. Фази на конверзијата	184
4.1.9.2. Технолошки и еколошки аспекти.....	185
4.1.10. Добивање бакар и електролитско прочистување	186
4.1.11. Прочистување на бакарот (Refining)	186
4.1.11.1. Принцип на електролитско прочистување .	187
4.1.11.2. Отстранување на примесите	189
4.1.11.3. Краен производ и квалитет	190
4.1.12. Еколошко влијание (Environmental Impact).....	191
4.1.12.1. Загадување на воздухот	191
4.1.12.2. Загадување на водите.....	192
4.1.13. Отпад и управување со талози	193
4.2. Хидрометалургија на бакар.....	194
4.2.1. Предности на хидрометалургијата.....	194
4.2.2. Недостатоци.....	194
4.2.3. Подготовка на рудата	195
4.2.4. Лужење.....	196
4.2.5. Реакции на лужење	197
4.2.6. Издвојување на металот	197
4.2.7. Електрохемиско издвојување на бакар	198
4.2.7.1. Услови и материјали.....	199
4.2.7.2. Хемиски реакции.....	200
4.2.7.3. Предности на електровинингот	200
4.2.8. Технолошки аспекти.....	200
4.2.9. Електрохемиско прочистување на бакар.....	201
4.2.9.1. Принцип на електрорафинација	202
4.2.9.2. Хемиски реакции во електрорафинација.....	203
4.2.9.3. Селективно одвојување на металите.....	203
4.2.10. Еколошки и економски аспекти	204
4.3. Прашања и одговори.....	206
4.4. Испитна задача.....	209

Поглавје 5 Производство на злато	216
5.1. Историски методи за добивање злато	218
5.1.1. Амалгирање со жива	219
5.1.2. Термички методи и топење	219
5.1.3. Ран хидрометалуршки пристап	220
5.1.4. Значење на историските методи	221
5.2. Современи методи за експлоатација	222
5.2.1. Цијанидно лужење	222
5.2.2. Агитирано лужење	222
5.2.3. Хип лужење (Heap Leaching)	223
5.2.3.1. Технолошки фази на процесо	223
5.2.3.2. Основен принцип	224
5.3.3. Carbon-in-Pulp (CIP) процес	225
5.3.3.1. Дијаграм на проток на раствори	226
5.3.4. Рециклирање и третман на цијаниди	226
5.3.5. Контролни параметри и услови	227
5.3.6. Предности на хип лужењето	228
5.3.7. Недостатоци	228
5.3.8. Мерки за заштита и контрола	228
5.3.9. Индустриски примери	229
5.3.10. Современи методи за експлоатација на злато	230
5.3.10.1. Површинско копање (Open Pit Mining)	230
5.3.10.2. Подземно копање	231
5.3.11. Современи иновативни методи	234
5.4. Еколошки аспекти и зелена металургија	236
5.5. Прашања и одговори	238
Поглавје 6 Производство на силициум	241
6.1. Физички и хемиски својства на силициум	244
6.1.1. Физички својства	244

6.1.2. Хемиски својства	245
6.1.3. Комбинирани својства и технолошко значење	246
6.2. Суровини и термодинамичка основа	248
6.2.1. Главни суровини	248
6.2.2. Термодинамичка основа на редукцијата	249
6.2.3. Енергетски и кинетички аспекти.....	250
6.2.4. Хемиска рамнотежа и термодинамичка анализа ..	250
6.2.5. Влијание на нечистотиите.....	251
6.3. Производство на металуршки силициум	253
6.3.1. Технолошки принципи	253
6.3.2. Конструкција и работа на електролачната печка..	253
6.3.3. Редукциони реакции и гасна динамика	254
6.3.4. Состав и својства на троската.....	255
6.3.5. Издвојување и ладење на силициумот	255
6.3.6. Контрола и параметри на процесот.....	256
6.3.7. Енергетска ефикасност и еколошки аспекти.....	256
6.4. Производство на високочист силициум	258
6.4.1. Siemens процес	258
6.4.2. Czochralski процес (монокристален раст).....	260
6.4.3. Алтернативни и современи методи.....	261
6.4.4. Еколошки и енергетски аспекти.....	261
6.5. Рафинирање и прочистување	263
6.5.1. Зонско топење (Zone refining)	263
6.5.2. Хлоридно прочистување (Chlorination refining)....	264
6.5.3. Плазмено прочистување (Plasma refining)	265
6.5.4. Комбинирани и напредни техники.....	266
6.5.5. Примена на високочист силициум	266
6.6. Примени на силициум	267
6.6.1. Металуршка и легирачка примена	267
6.6.2. Примена во електроника и микроелектроника	268

6.6.3. Силициум во фотоволтаика (соларна енергија).....	268
6.6.4. Примена во хемиската индустрија	269
6.6.5. Нанотехнологија и напредни Каменециеријали	270
6.7. Наноструктури на силициум.....	272
6.7.1. Видови на наноструктури на силициум.....	272
6.7.2. Методи за синтеза на наноструктури на силициум.....	273
6.7.3. Својства и предности на наноструктурираниот силициум.....	274
6.7.4. Примени на наноструктури на силициум	274
6.8. Еколошки аспекти и зелени технологии.....	277
6.8.1. Енергетска ефикасност и оптимизација на процесите	277
6.8.2. Намалување на емисиите на CO и CO ₂	277
6.8.3. Управување со отпад и рециклирање	278
6.8.4. Кружна економија и зелена металургија	279
6.8.5. Премин кон обновлива енергија.....	279
6.8.6. Интегриран пристап кон одржливо производство	280
6.9. Прашања и одговори.....	282
6.10. Испитна задача.....	285
Поглавје 7 Производство на олово	293
7.1. Општ преглед на технолошкиот процес	293
7.2. Сировини за производство на олово	297
7.3. Подготовка и збогатување на рудата	300
7.4. Печење на оловниот концентрат	305
7.4.1. Хемизам на процесот на печење.....	305
7.4.2. Температурни услови и кинетика на процесот	306
7.4.3. Индустриски агрегати за печење.....	306
7.4.4. Цели и резултати од печењето.....	308

7.4.5. Еколошки и индустриски аспекти.....	308
7.4.6. Образовно значење	309
7.5. Редукционо топење.....	310
7.5.1. Индустриски аспекти и контрола на процесот.....	313
7.6. Рафинација на оловото	314
7.6.1. Пирометалуршка рафинација на олово.....	314
7.6.1.1. Хемизам на пирометалуршката рафинација	314
7.6.1.2. Однесување на бакарот	315
7.6.1.3. Бизмут (технолошки најпроблематична примеса)	315
7.6.2. Електролитичка рафинација на олово.....	316
7.6.2.1. Хемизам на електролитичката рафинација ..	316
7.7. Индустриска контрола на емисии	319
7.8. Рециклирање на оловни акумулатори.....	321
7.9. Табеларен преглед на типични параметри	324
7.10. Прашања и одговори.....	325
7.11. СТУДИЈА НА СЛУЧАЈ (CASE STUDY)	328
Литература	333
Листа на кратенки во учебникот	336
Толковник на стручни металуршки изрази	338
Тестови за испит.....	341
1. Варијанта 1	341
2. Варијанта 2	344
3. Варијанта 3	346
4. Варијанта 4	348

ПРЕДГОВОР

Металургијата, како темелна инженерска наука и технолошка дисциплина, претставува еден од најзначајните столбови на современата индустријализација. Развојот на човечката цивилизација, од бронзената и железната доба па сè до модерното време на напредни Материјали и нанотехнологија, е нераскинливо поврзан со усовршувањето на методите за добивање, обработка и примена на металите. Преку својата мултидисциплинарна природа металургијата ги обединува знаењата од хемијата, физиката, термодинамиката, механиката и науката за Материјалите, создавајќи системски пристап кон трансформацијата на суровините во Материјали со висока додадена вредност.

Овој труд, насловен „Вовед во металургија“, има за цел да обезбеди севкупно и системско запознавање со основните принципи на металуршкото производство. Преку јасно дефинирани поглавја и објаснети процеси, тој претставува водич за студентите на техничките факултети, особено оние од насоката за Технологија и Металургија, но истовремено може да биде корисен и за инженери, техничари и практичари кои работат во индустриски погони.

Металургијата, како економска гранка, не се занимава само со добивање метали од руди, туку и со нивна натамошна преработка во полупроизводи и готови производи кои се основа за други индустриски гранки – од машинството и градежништвото, до транспортот и електрониката. Разбирањето на нејзината структура и поделба – на екстрактивна и преработувачка металургија – е суштинско за секој студент што првпат се среќава со оваа наука. Затоа, авторот со голема педантност ги разработува

основните методи за добивање на металите: пирометалуршки, хидрометалуршки и електрометалуршки процеси, нагласувајќи ја нивната меѓусебна поврзаност, предности и ограничувања.

Посебен акцент е ставен на подготовката на суровините, што претставува клучен предуслов за секое успешно металуршко производство. Деталното објаснување на технолошките операции како: дробење, мелење, сеење, обогатување, згуснување, филтрирање и сушење, овозможува студентите да ја разберат целокупната логика на индустрискиот процес – од рудата како природен Материјал до концентратот како технолошки подготвен производ. Во тој контекст, трудот не само што дава теоретски основи, туку и практични насоки, поткрепени со илустрации, шеми и опис на современи уреди и постројки.

Авторот пристапува кон проблеКаменециката со изразена систеКаменецичност и инженерска прецизност. Поглавјата се градираны според логичкиот редослед на операциите во реалниот технолошки процес, при што секоја постапка е објаснета преку својата суштина, цел и влијание врз квалитетот на финалниот производ. Во делот посветен на металуршката подготовка, акцент е ставен на процесите на укупнување (брекетирање, агломерација, синтерување и пелетирање), кои претставуваат неопходен чекор за обезбедување оптимални физички и хемиски својства на Материјалот што ќе влезе во високотемпературните агрегати.

Овој пристап има не само техничка, туку и економска димензија, бидејќи од степенот на подготовка на суровината директно зависат енергетската ефикасност, приносот на метал и животниот век на опреКаменеца. Со тоа, авторот ги поврзува основните инженерски операции со концептите на одржливо производство, рационално користење ресурси и намалување на отпадот, што е во согласност со современите принципи на „зелена металургија“.

„Вовед во металургија“ не е само учебник во традиционална смисла, туку и методолошки прирачник за разбирање на индустрискиот екосистем. Преку систеКаменецки

опис на процесите студентите се воведуваат во практичното размислување на инженерот – како да се идентификуваат главните ограничувачки фактори, како да се оптимизираат условите во процесот, и како да се воспостави рамнотежа меѓу техничката изводливост, економичноста и еколошката одржливост. Овој труд, со својата јасност и логичка структура, им овозможува на читателите да го развијат неопходното инженерско интуитивно мислење, кое подоцна ќе го применуваат во решавање на реални индустриски проблеми.

Дополнително, богатата илустративна содржина – шеми на дробилки, млинови, филтри, згуснувачи и агломерациони постројки – придонесува кон визуелно и аналитичко разбирање на Каменециријата. Со вклучувањето на современи примери од македонската и европската металуршка индустрија, трудот го надминува чисто академското ниво и станува практичен водич за инженерска примена.

На крајот, може да се заклучи дека овој труд претставува значаен придонес кон образовната и техничката литература во областа на металургијата. Тој е резултат на вниКаменециријата систеКаменецизирано знаење и долгорочно искуство во наставно-научната работа. Со својата јасна структура, концизен јазик и богата технолошка содржина, „Вовед во металургија“ го отвора патот за понатамошно изучување на специјализирани дисциплини, како што се: пирометалургијата, хидрометалургијата и електрометалургијата.

Трудот има за цел не само да ги запознае студентите со технолошките принципи на металуршкото производство, туку и да ја разбуди нивната љубопитност, критичка мисла и одговорност кон општеството и животната средина. Со тоа, тој придонесува за создавање нова генерација инженери – компетентни, иновативни и свесни за значењето на одржливиот индустриски развој.

Посвета

Со длабока љубов, благодарност и вечна почит им ја посветувам оваа книга на моите починати родители **Блага и Тодор Димитрови**, чии животни вредности, пожртвуваност и човечка добрина беа темелот врз кој го изградив мојот пат. Нивната поддршка, вера и љубов остануваат моја трајна инспирација во секој чекор, збор и дело.

Александар Димитров

Поглавје 1 Основни металуршки процеси

Металургијата е стопанска гранка која се занимава со производство на метали, метални Материјали и нивна понатамошна преработка во готови производи или т.н. полуфабрикати, кои претставуваат појдовен Материјал за производство на други производи. На пример, готови производи (фабрикати) од металуршкото производство се капаците на уличните шахти, шините во железничкиот транспорт, деловите во автомобилската индустрија, кукиштата за различни машини итн. Полупроизводи или полуфабрикати се лимови и профили од различни метали и Материјали: челични лимови (пластифицирани) во градежништво, челични шипки, челични лимови за производство на каросерии во автомобилската индустрија, производство на жица, на пр., бакарни спроводници, челични жици за производство на мрежи, шпанцање заковки, производство на алуминиумски профили за изработка на прозорци и врати итн.

Делот од металургијата кој се занимава со добивање на металите и металните Материјали се вика екстрактивна

металургија, а делот од металургијата кој се занимава со производство на полуфабрикати и готови производи се вика преработувачка металургија.

Металургијата како инженерска наука се занимава со проучување и развој на методи за добивање на металите од суровини и нивната натамошна преработка до полупроизводи (полуфабрикати) и готови производи.

За добивање на металите од руди се користат различни хемиски и физичко-хемиски процеси чија основна цел е металот да се извлече од хемиското соединение, на пр., минералот, и да се одвои од неметалните компоненти во суровината (јаловината).

Овие методи или постапки се викаат металуршки процеси и во основа може да се поделат во три основни групи:

- пиromеталуршки
- хидрометалуршки
- електрометалуршки.

Главна карактеристика на пиromеталуршките процеси е таа што тие се одвиваат при повишени температури, при што се овозможува одвивање на потребните физичко-хемиски претворби и промени на Материјалот.

Особеностите на хидрометалуршките процеси се состојат во тоа што рудите се обработуваат со хемиски реагенси во водени раствори, т.е. корисните метали се преведуваат во воден раствор, а потоа од него се извлекуваат по некоја соодветна постапка. Јаловината која е нерастворлива супстанција останува како талог во суспензијата.

Електрометалуршките процеси, во зависност од начинот на користење на електричната енергија, може да се поделат во две основни групи:

- електротермички
- електрохемиски.

Во првата група, електричната енергија се користи како извор на топлина. Во втората група на процеси (електрохемиски), електричната струја се користи за електролитичко дејство во водени раствори или растопи, при што металот се издвојува на катодата и со тоа се одделува од останатите примеси.

Пирометалуршките процеси понатаму може да се поделат на три основни групи: процеси на жарење, топење и дестилација.

Процесите на жарење се одвиваат при такви температури што овозможуваат реализација на неопходните хемиски процеси, на пр., оксидација, хлорирање, сулфатација, редукција, топење на металот итн. Обично со жарењето на шаржата се врши подготовка за следната операција, на пр., топење.

Процесот на топење претставува технолошка операција во која целата шаржа се топи, при што се добиваат обично два течни раствора кои помеѓу себе не се мешаат: суров метал и троска. На тој начин металот (во суровиот метал) се издвојува од јаловината (содржана во троската).

- **Троската претставува** растоп на оксиди со различен состав кој се образува при топење на шаржата. Понатаму, при пирометалуршкото добивање на металите, за време на нивна рафинација повторно се образува троска, во која се содржани несаканите примеси во металот. Во троската се содржани топители кои се присутни во шаржата. Меѓутоа, во троската речиси секогаш е содржано и некое мало количество метал (загуба на метал).

- **Топителите** се супстанции или Материјали кои се додаваат во шаржата за да се добие по можност троска со поволен хемиски состав и погодни физичко-хемиски својства за производство на конкретниот метал.

Троската има важна улога, особено во процесите кои се одвиваат во шахтните печки. Голем број од процесите, односно од хемиските реакции при добивање на металите се одвиваат во троската. Затоа, за конкретна технологија на добивање на металот се организира конкретен режим на работа, односно избор на

процесни параметри и состав на шаржата, за да се добие троска која ги задоволува потребните барања.

Во некои случаи, кога добивање на металот со директна редукција не е технолошко-технички, или, пак, економски најповолната технолошка постапка, се воведува постапка на добивање на меѓупроизвод т.н. „камен“ или „каменец“.

- Каменецот претставува растоп на сулфиди на металите FeS , Cu_2S , NiS , PbS и др. Каменецот се јавува како меѓупродукт при топење на руди на обоените метали и претставува основа за пирометалуршко добивање на никел и бакар. Постојана примеса во каменецот е FeS . Одделувањето на каменецот од троската се базира на разликата во нивните густини (специфични густини) и на нивната слаба заемна растворливост.

- **Дестилација или сублимација** е процес кој се користи при добивање метали со ниска температура на вриење (жива, цинк). Процесот на дестилација се базира на фактот дека при температура на редукција образуваниот метал или сулфид има повисок рамнотежен притисок на пареите од атмосферскиот. Образованите метални пареи (гас) се отстрануваат од местото на нивното образување, па со понатамошна кондензација се издвојува металот (во течна или цврста состојба).

Пирометалуршката постапка за добивање на металите не е погодна за руди кои се сиромашни со металот. Ако ваквите руди не се обогатат претходно со кој било метод, нивната обработка по пирометалуршка постапка би била несекономична и би довела до голема загуба на металот. За руди во кои металот е малку застапен (сиромашни руди) и чија подготовка (концентрација, обогатување) за пирометалуршка постапка не е погодна или економична, се применува хидрометалуршката постапка за добивање на металот.

Хидрометалуршката постапка има широка примена во металургијата. Во основа, таа наоѓа примена во случај кога за дадениот метал во суровината може да се користи некој селективен реагенс кој го преведува металот во некое соединение со голема растворливост во вода или разреден воден раствор на

некоја киселина, додека останатите компоненти во рудата, пред сè, јаловината, остануваат во облик на соединенија кои се нерастворливи (или слабо растворливи) во вода. По филтрација на пулпата, односно одделување на растворот од нерастворената јаловина (талог), металот од растворот се издвојува, на пр., во процес на цементација (таложување на металот од растворот со супституција со друг метал) или во процес на електролиза. Потоа, исталожениот метал на катодата (кој често содржи и други метали) се топи и најпосле по некоја соодветна постапка се рафинира (прочистува од несаканите примеси).

Процесот на растворање на металот од рудата се вика процес на лужење, кој во суштина претставува селективно растварање на металот, односно преведување на металот од рудата или прженецот во раствор. Процесот на лужење се нарекува по името на растворот за лужење. Така, на пример, голема примена во металургијата имаат раствори за лужење кои содржат сулфурна киселина, ферисулфат, амонијак итн. Во овие случаи зборуваме за кисело лужење, амонијачно лужење итн. Недостаток на хидрометалуршката постапка за добивање метали е употребата на големи агрегати за лужење, бидејќи се работи со голема количина суровина, раствори итн. Предност, пак, на оваа постапка е тоа што може да се користи за добивање метали од многу сиромашни руди, за кои не постои некоја економична постапка за нивна подготовка или концентрација, за потоа да се примени некоја пирометалуршка постапка за издвојување на металот.

Електрометалуршката постапка за добивање на металите наоѓа широка примена во црната и обоената металургија.

Електролизата како метод за издвојување на металите од водени раствори добиени при лужење има широка примена во металургијата. Освен електролиза во водни раствори, за добивање на металите се користи и електролиза на растопи, на пр., добивање алуминиум. Понатаму, електролизата има широка примена и во процесите на рафинација на металите. Природата на

електролизата во водени раствори и растопени соли е идентична, бидејќи тие се базираат на истите физичко-хемиски принципи.

Во последно време, електрометалуршката постапка има широка примена во процеси каде што за топење на шаржата, односно нејзино загревање се користи електрична енергија како извор на топлина во т.н. електропечки.

1.1. Подготовка на суровини

Појдовна (примарна) суровина за производство на металите е рудата. Основниот метал во неа обично е присутен во облик на некое хемиско соединение (минерал), кое по своите физичко-хемиски својства (хемиски состав, кристална структура) битно се разликува од останатите супстанции во рудата. Оној дел од рудата во кој не е содржан корисниот минерал се нарекува јаловина. Освен рудата, како појдовна суровина за производство на металите се користат и разни меѓупродукти или отпадоци во производството на некои други метали. На пример, во производството на некои обоени метали, меѓупродуктите кои отпаѓаат при нивната рафинација служат како појдовни суровини за производство на благородни метали (злато, сребро) или некои ретки метали (индиум, германиум). За производство на металите се користат и отпадоци за рециклирање, на пример, автомобилски отпад.

Техничката постапка за добивање на некој метал обично ја викаме металургија на металот, на пр., металургија на железо, металургија на феролегури (добивање легури на железото), металургија на бакар, металургија на ретки метали итн. Истото значење на поимот технолошка постапка го има и поимот технологија, односно технолошка постапка, технолошка операција итн.

Практична примена или реализација на некоја технолошка постапка во индустриското производство претставува мноштво исполнети барања. Секоја технологија мора да биде економски оправдана, односно профитабилна (да обезбеди профит). Меѓутоа, профитот не е единствениот критериум или услов за примена на некоја технологија. Подеднакво важни се и другите неекономски аспекти, како, на пример, доследно спроведување на хигиено-техничката заштита на персоналот, почитувањето на мерките за заштита на животната средина итн.

Во денешно време за производство на метали се користат руди кои се претежно сиромашни, односно во кои уделот на корисниот минерал е толку низок што употребата на таквите руди

(па и други сировини) не ги задоволува економските критериуми. Од тие причини примарните сировини кои се користат во металуршкото производство претрпуваат соодветна подготовка која во зависност од натамошната процедура мора да задоволи барања кои ги поставува конкретната технолошка постапка.

Од горенаведените причини, речиси кај сите руди се прави нивно обогатување, односно концентрација на корисниот метал. На тој начин се намалува учеството на јаловината во процесот на производство на конкретниот метал, а со тоа се зголемува производноста на индустриските капацитети и воопшто економичноста на процесот. На пример, во последните неколку децении, но и денес, за производство на челик во железарниците во Германија се користат железно-рудни концентрати од прекуокеанските земји.

Методите за обогатување на примарните сировини (рудите), односно концентрацијата на корисните минерали во рудите, главно се сведуваат на две методи: методи без промена на хемискиот состав и методи со промена на хемискиот состав на сировината.

1.1.1. Без промена на хемискиот состав

Основни технолошки операции за обогатување или концентрација на рудата по овој метод се: дробење, мелење, класификација (сеење) и некои други операции специфични за соодветната технологија.

1.1.1.1. Дробење на рудата

Рудата во примарен облик, т.е. форма по откопот се наоѓа во облик на парчиња со различна големина и не е погодна за директна употреба. Понатаму, корисниот или корисните минерали се распределени со различна концентрација во рудните парчиња што го отежнува оптималното водење и управување на технолошкиот процес. Дробењето е првата технолошка операција во која рудата со различна големина на парчињата се иситнува до релативно поситни парчиња. Со дробење на рудата парчињата се уситнуваат, се зголемува специфичната површина на рудата

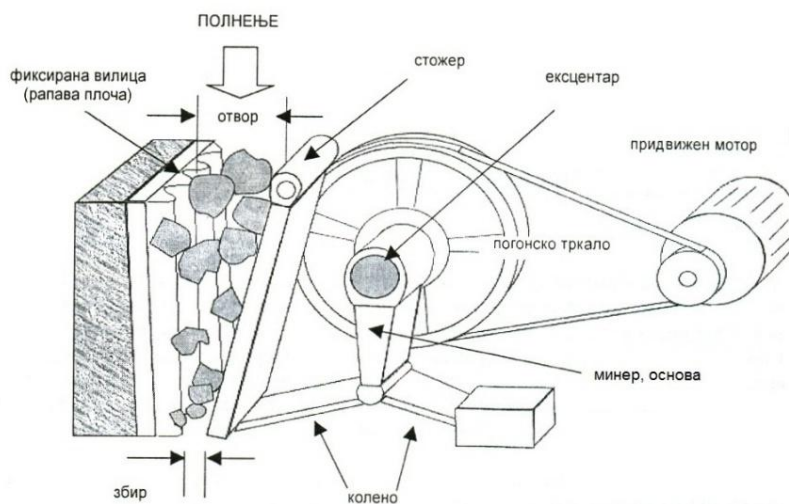
(m^2/kg), понатаму минералите, односно зрната на корисниот минерал кои биле вградени во внатрешноста на рудните парчиња во здробената руда се наоѓаат на површината на рудните парчиња, со што во некои случаи се олеснува процесот на концентрација.

За процесот на дробење се користат дробилки со различна конструкција и производност, така што изборот на тип и капацитет на дробилка се врши според физичко-механичките својства на рудата, а во прв план и според конкретната технолошка постапка.

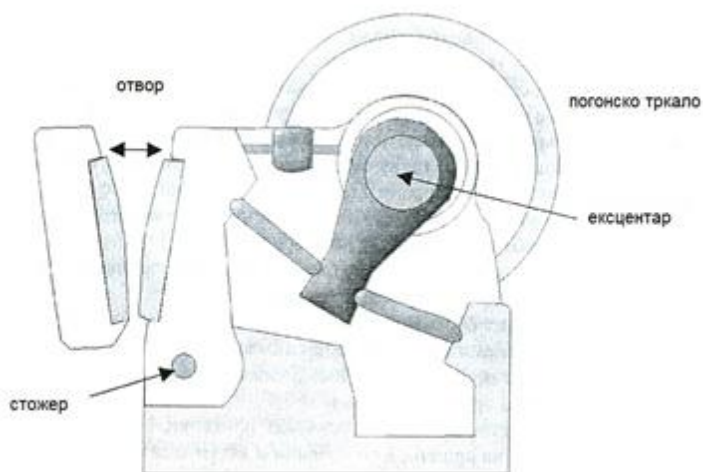
- **Дробилка во вид на вилица**

Се користи за крупно, но поретко и за средно дробење. Се состои од две челюсти поставени под одреден агол, од кои едната е стабилна, неподвижна, а другата подвижна. Работните површини на челюстите се менуваат и претставуваат назабени или рамни плочи од манганов челик.

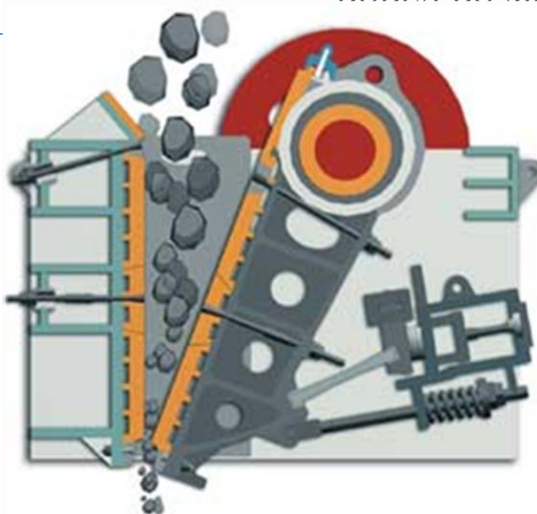
Подвижната челюст може да биде закачена на оска во горниот или долниот крај. Кај дробилката за грубо дробење оската на подвижната челюст се наоѓа на горниот крај, а кај оние за средно дробење на долниот крај. Ако е оската на горниот крај, силата на дробилката е поголема, но издробениот Материјал е со понерамномерна крупност, бидејќи долниот отвор се менува.



Слика 1.1. Дуплоколенеста дробилка со вилици



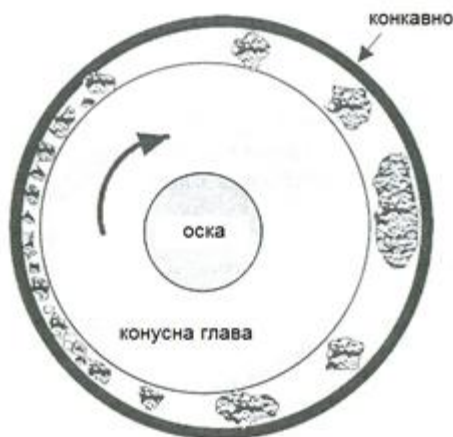
Слика 1.2. Вилична дробилка на Доу



Слика 1.3. Дробилка во вид на вилица

- **Ротирачка конусна дробилка**

Се употребува поретко за грубо, а најчесто за средно дробење. Се состои од еден неподвижен дебел прстен, кој претставува пресечен конус со широкиот дел нагоре. Во тој конус на оската е поставен друг конус, и тоа со широкиот дел надолу. Конусите се обложени со манганов челик.



Слика 1.4. Пресек на ротирачки кршач

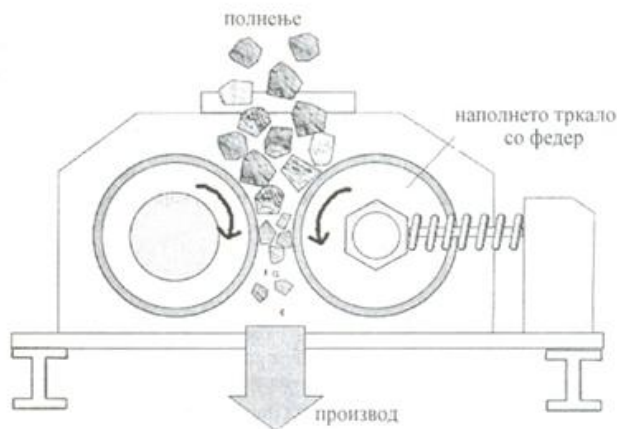
Движењето на внатрешниот конус се изведува така што на момент се доближува, а на момент се оддалечува од внатрешните сидови на надворешниот конус. При приближувањето кон сидовите на конусот се врши дробење на Материјалот, а при оддалечување Материјалот се ослободува и паѓа надолу.

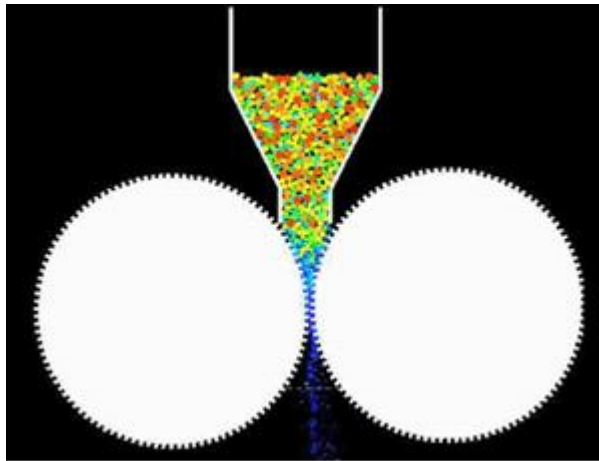
Конусната дробилка дроби истовремено како со притисок, така и со триење. Таа има поголема производност и кај неа подобро се искористува енергијата, отколку кај челусната дробилка, бидејќи нема празен од. Конусната дробилка дава помал процент на ситнеж и прашина на рудата.

Како поголеми недостатоци на конусната дробилка можат да се набројат следниве: има посложена конструкција, потежок ремонт, бара повисока просторија.



Слика 1.5. Секундарна конусна дробилка





Слика 1.6. Дробилки со тркала

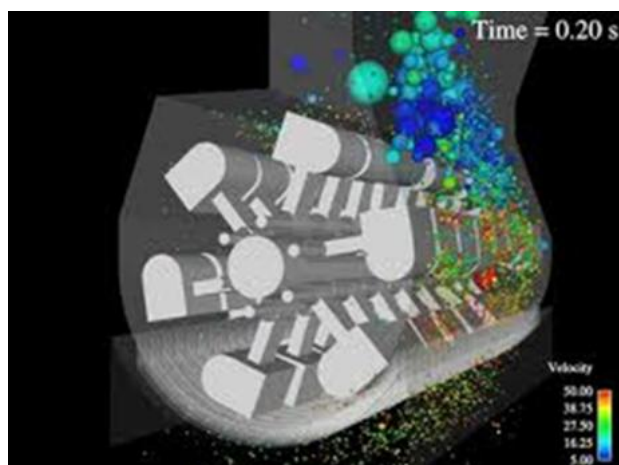
- **Дробилки со тркала**

Овој тип на дробилка се употребува за ситно дробење, најчесто за покруги Материјали.

Главниот дел се состои од два валјаци со калена површина, поставени напоредно во хоризонтална положба. При дробењето се вртат спротивно еден на друг. За превенција од хаварија при паѓање на потврдо тело, едниот од валјаците се притиска кон другиот со помош на спирални пружини. За подобро зафаќање на Материјалот, валјаците се избраздени. Материјалот што можат да го приКаменец валјаците треба да биде со крупност 20 пати помала од нивниот дијаметар. Поради константниот отвор меѓу валјаците, издробениот Материјал има порамномерна крупност, отколку кај другите дробилки.

- **Дробилки со чекани**

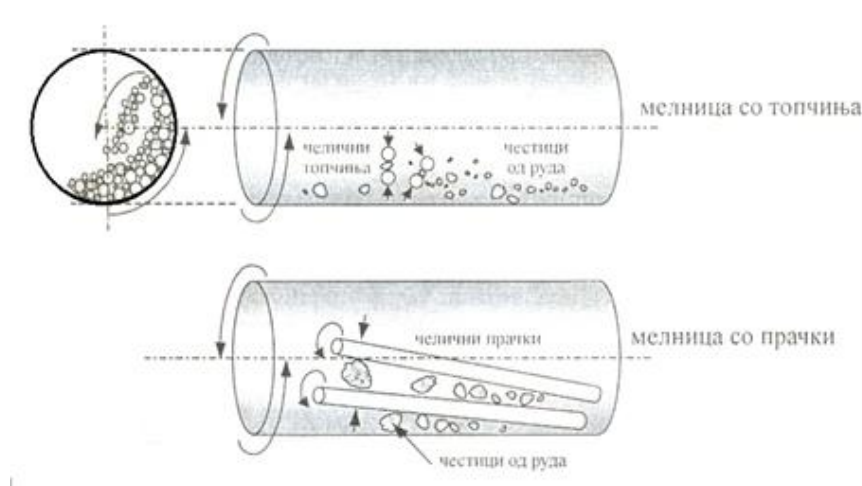
Дробилките со чекани се наменети за дробење на покруги Материјали (јаглен, варовник и др.) Кај овие дробилки дробењето се врши со удирање врз Материјалот на подвижни чекани кои се вртат заедно со диск. Освен тоа, здробениот Материјал удира на закосената плоча и во шините од решеткастото дно.



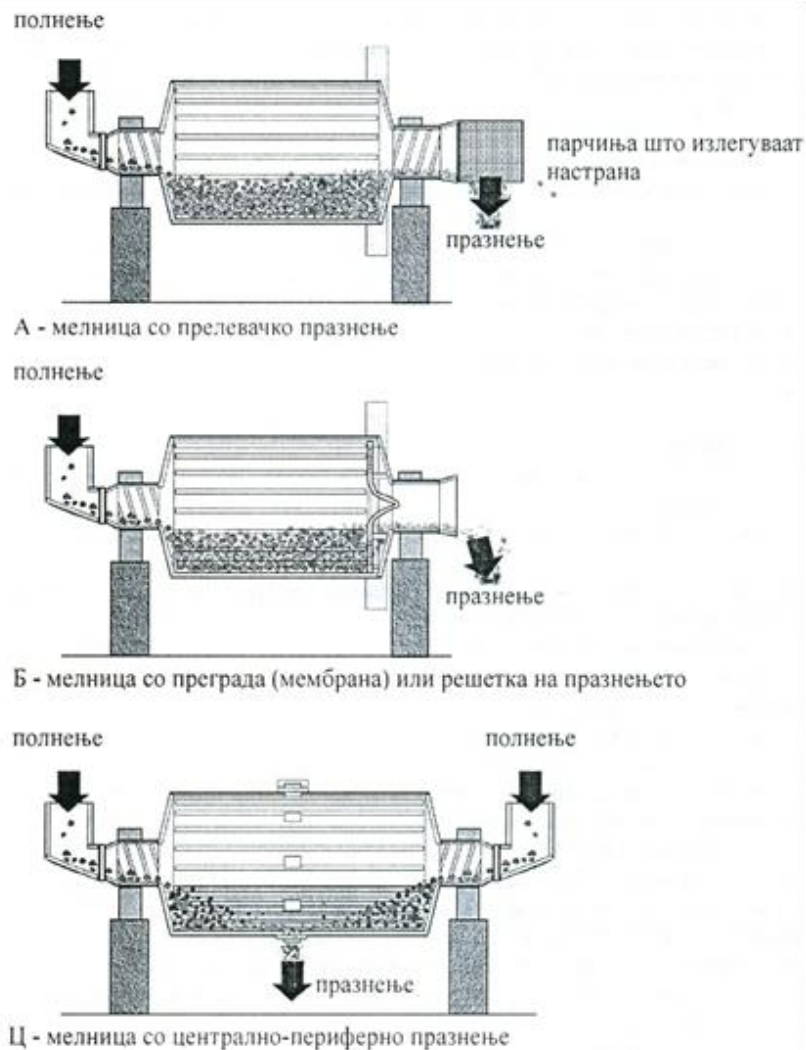
Слика 1.7. Дробилка со чекани

1.1.1.2. Мелење на рудата

За да се продолжи со процесот на понатамошно ситнење на рудата, доколку тоа е потребно, здробените рудни парчиња се мелат во т.н. мелници. Во металургијата најчесто се користат мелници од типот „топчести млинови“ кои работат во сува или водена средина.



Слика 1.8. Цилиндричен млин; А. со топчиња и Б. со прачки
млинови наместо мелници во сликата



Слика 1.9. Типови цевчести млинови и во сликата

1.1.1.3. Сеење на рудата

Сеење е операција во која сомелениот Материјал се сепарира или класира во класи со одредена големина на зрната. За сеење се користат рамни сита кои вибрираат или ротираат, и тие претставуваат барабани чии сидови се перфорирани (со отвори со одреден дијаметар), со што се одредува и класата чии зрна поминуваат низ отворите.

Кај технолошката операција сеење е воведен поим дијаметар на зрно. Бидејќи ниту една суровина при дробење или мелење не се иситнува во парчиња со сферичен облик (геометрија на топка), веднаш станува јасно дека со воведување на поимот „дијаметар на зрното“ се воведува некоја хипотетичка (непостоечка) геометрија на зрната, чија цел е приближно да се направи гранулометриска карактеризација на Материјалот. Сето ова ќе биде објаснето во примерите што следуваат.

Ако површината (плоштината) и волуменот на некое геометриско тело се пресметуваат само од една негова димензија, тогаш зборуваме за „еднодимензионално тело“. На пример, коцката е еднодимензионално тело бидејќи нејзината површина P и волуменот V се пресметуваат само од должината на страната a :

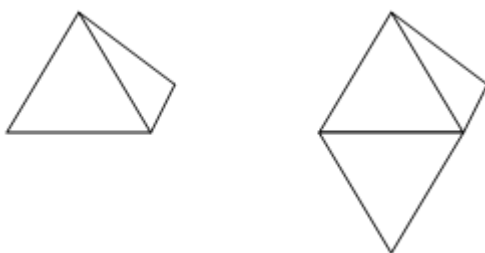
$$P = 6 \cdot a^2; \quad V = a^3$$

Други еднодимензионални тела се, на пример:

Топка со радиус R :

$$P = 4 \cdot R^2 \cdot \pi; \quad V = \frac{4 \cdot R^3 \cdot \pi}{3}$$

Рамностран тетраедар (дитетраедар) со страна a :



Специјален цилиндар чија висина X е еднаква со должината на дијаметарот ($2R$):

$$X = 2 \cdot R; \quad P = 6 \cdot R^2 \cdot \pi; \quad V = 2 \cdot R^3 \cdot \pi$$

Воведувањето на овој хипотетички поим „големина“ или „радиус“ на рудно зрно е оправдано и има голема практична вредност. Ако парче од некоја крта руда го здробиме со чекан, тоа ќе се распадне на поголем број поситни парчиња. Со натамошно дробење на парчињата се добиваат поголем број поситни парчиња кои сè повеќе геометриски наликуваат на „еднодимензионално тело“.

За да се направи карактеризација на распределбата на поединечните класи (зрна со одредена големина на радиусот) се прави т.н. „ситова“ или „гранулометриска анализа“, која се состои од следното: ситен Материјал се сее на сито со радиус на отвор m во mm . При тоа, зрната со радиус поголем од m во mm се задржуваат над ситото. Оваа фракција се нарекува „надсито“. Зрната со радиус помал од отворот m се сеат понатаму на сито со помал радиус на отворот од m во mm , на пр., радиус на отворот n во mm . Оваа фракција се нарекува „подсито“. На овој начин од сомелената руда се издвојува фракцијата $(- m + n)$, односно фракција во која зрната со радиус помал од m во mm поминуваат, додека на сито со радиус n во mm се задржуваат. Оваа анализа се реализира на серија сита со различна големина на отворите. За да се добие претстава за распределбата на поединечните класи во ситниот Материјал, масениот удел на поединечните класи (маса на класата по однос на вкупната маса на Материјалот) графички се прикажува како функција од радиусот на зрната или, пак, масениот удел на класите се прикажува во облик на хистограми. Со помош на хемиска анализа на поединечните класи може да се одреди распределбата на корисниот минерал, односно неговата распределба во вкупниот Материјал. Од оваа анализа може да се донесат заклучоци кои ќе помогнат во евентуалниот избор на метод за обогатување (концентрација) на корисниот минерал во суровината. Инаку, денес, за ситен Материјал со големина на зрното помало од $0,1\text{ mm}$ гранулометриската анализа се прави многу брзо со ласерска апаратура, при што се одредува фреквенцијата на зрната во поединечните класи, која поделена со вкупната фреквенција претставува удел на радиусот на зрната, односно класата во Материјалот. Кај хомоген Материјал

фреквенцијата на зрната во класата е пропорционална на масениот удел, меѓутоа ова не важи за хетероген Материјал.

1.1.2. Обогадување на минералните сировини

Под поимот обогадување на минералните сировини подразбираме концентрација (концентрирање) на корисните минерали, односно нивно одделување од јаловината. Со оваа операција се зголемува масениот удел (на пр., %) на корисните минерали во концентратот.

Во продолжение ќе бидат разгледани некои од методите за обогадување на рудите.

- **Обезводнување**

Ако во процесот на обогадување се користи вода, односно корисните минерали се концентрираат во водена суспензија, на пр., флотациски концентрати, концентрати од магнетна сепарација во водена средина, во продолжение на постапката за обогадување следува технолошка операција во која тврдиот концентрат (зрната) се одвојува од водата.

Во најопшт случај, оваа технолошка операција се изведува во три фази:

1. згуснување на суспензијата
2. филтрација
3. сушење

- **Згуснување**

Згуснувањето на пулпата претставува процес во кој тврдите честички се таложат на дното од садот во кој се врши згуснувањето на пулпата. Современите згуснувачи работат континуирано со што се зголемува капацитетот на погонот во кој се врши оваа технолошка операција. Апарат за згуснување претставува цилиндар со конусно дно. Со воведувањето на суспензијата во згуснувачот, поради падот на брзината со која се движат тврдите честички во суспензијата, тие се таложат на дното, додека водата во горниот дел (приближно чиста вода) се одлева од згуснувачот надвор. За да се постигне подобар ефект на

згуснување, во водата се додаваат супстанции (на пр., CaO , CaCl_2) т.н. флокулатори кои ги неутрализираат електроодбивните сили помеѓу тврдите честички. Последица од додавањето на флокулатори е образувањето покрупни флокули, односно агрегирани честички кои побрзо се таложат на дното на згуснувачот. Ефектот на згуснување се зголемува со додаток на едно ротирачко гребло (нож) на дното на згуснувачот. Оптималната работа на згуснувачот се насочува така што излезната (одлеаната) вода од згуснувачот да биде што е можно побистра (почиста).

- **Филтрација**

Филтрацијата претставува технолошка операција во која тврдите честички (талогот) се одделуваат од течноста (водата) на порозна преграда (филтер), при што водата поминува низ порите на филтерот, а талогот останува на филтерот. Брзината на процесот на филтрација е директно пропорционална на површината на филтерот и разликата на притисокот на течноста (водата) пред и зад филтерот, а обратно пропорционална на вискозитетот на течната фаза (водата). Апаратите во кои се врши филтрација се викаат филтри. Најчесто во металургијата се користат вакуум филтрите кои можат да работат дисконтинуирано и континуирано. Дисконтинуираните наоѓаат примена таму каде што се работи за помали количини Материјал за филтрирање. Меѓутоа, континуираните вакуум филтри се погодни во погони каде што се бара висока производност. ФорКаменец на овие филтри е едноставна: се состојат од еден барабан (цилиндар) кој од надворешната страна е перфориран и обвиен со филтер платно.

Во внатрешноста, барабанот е поделен на повеќе комори, на пр., осум комори. Во осовината на барабанот кој ротира вронет во када со суспензија се наоѓа цевка која по потреба се вклучува на вакуум пупма или компресор за воздух. Кога внатрешните комори во барабанот се потопени во суспензијата, тие се вклучени на вакуум системот. Тоа е фаза на филтрација. При тоа од надворешната страна на филтерот е наталожен талогот. Кога

барабанот ќе се заврти и овие комори ќе дојдат во горната положба, надвор од суспензијата, во нив се вдувува компримиран воздух, така што талогот полесно се ослободува од филтерот. На тоа место (горе) од надворешната страна на барабанот се поставени статички гребла во близина на филтер платното, кои дополнително ја симнуваат т.н. филтер погача или слојот од наталожени цврсти честички.

- **Сушење**

Сушењето на минералните сировини или концентрати претставува технолошка операција во која со (или без) загревање на Материјалот, по пат на испарување се отстранува делумно или целосно механички присутната вода, при што сувиот Материјал (руда, концентрат итн.) не претрпува никаква хемиска или физичка промена, на пр., оксидација на воздух, сублимација, дехидратација на кристална вода итн. Секако, процесот на сушење се применува само во оние случаи кога е неопходен предуслов за понатамошниот технолошки третман на сировината.

За сушење на влажни концентрати најчесто се користат ротациони сушари. По конструкција, овие сушари претставуваат барабан (цилиндар) кој е поставен на коса од влезот на влажниот концентрат кон излезот на сушениот концентрат. Во внатрешната страна на цилиндарот се прицврстени попречни плочи кои во време на ротација на сушарата дополнително го мешаат цврстиот Материјал, со што процесот на сушење се забрзува. По потреба во сушарата се воведуваат топли гасови (обично отпадни гасови) од долната страна на барабанот, при што тие се движат во спротивен правец од тврдиот Материјал.

1.2. Металуршка подготовка

Укрупнување на суровините е процес кој е неопходен во случај кога суровината претставува ситнозрнест Материјал, а технологијата за добивање на металот се реализира во шахтна печка или воопшто во агрегат во кој шаржата треба да поседува точно одредени механички својства, на пр., тврдина, порозност, гасна пропустливост итн. Најчесто користени методи за укрупнување на ситнозрнести Материјали се: брикетирање, агломерирање, синтерување, пелетирање.

Овој процес на укрупнување на ситни честички (зрна) од суровината (концентратот) се реализира при повишена температура, при која зрната омекнуваат и заемно се спечуваат. Добиениот Материјал во овој процес се вика агломерат. Во процесот на агломерација суровината може да претрпи и хемиска промена. Така, на пример, спечувањето, односно агломерацијата на Материјалот може да биде последица од образување силикати.

Предности на процесот на агломерација се:

1. Ситнозрнестот Материјал (прашина) се враќа повторно во процесот,
2. Подобрување на редукционите резултати и производноста,
3. Рамномерна работа на печката.

Ако во процесот на агломерација на суровината не се образува (добива), односно обезбедува квалитетен агломерат кој ги задоволува барањата во натамошните фази на производство, процесот на укрупнување се реализира не само со спечување, туку и со брикетирање, односно правење брикети (отпресоци).

1.2.1. Брикетирање

Брикетирање се нарекува процесот на пресување ситни (20 – 0 мм) и прашести руди и концентрати во парчиња со правилна и еднообразна геометриска форма. Брикетирањето се применувало многу поодамна од агломерирањето. Но, со појава на агломерацијата, тоа изгубило многу од своето значење. Главна

причина за тоа се неговите повисоки производствени трошоци и помалиот капацитет на производство, како и некои други недостатоци на брикетите. Брикетите се покомпактни и послабо редукутивни. Освен тоа, брикетирањето не дава можност за отстранување на некои од штетните примеси, како што се: S, As, CO₂ и др. Основните фактори од кои зависи добивањето брикети со добар квалитет се: притисокот при пресувањето, гранулометрискиот состав на Материјалот, влажноста, количеството и видот на врзивни средства, условите на сушење и загревање на брикетите и др. За секој вид руда или концентрат оптималната постојаност на тие фактори се одредува со опит.

Добиените брикети треба да ги исполнуваат следните барања:

- да бидат постојани на високи температури и притисок,
- да се отпорни на влага,
- да имаат извесна минимална порозност,
- да се што е можно повеќе богати со метал.

Во основа, разликуваме два вида брикетирање:

1. Брикетирање без употреба на врзивно средство, каде се бара повисок притисок (750 – 2000 $\text{крс}\text{м}^{-2}$), за да можат брикетите да ја имаат бараната цврстина. Јакоста на овие брикети ретко е 10 – 15 $\text{крс}\text{м}^{-2}$. Затоа, за нејзино зголемување брикетите се жарат до определена температура, при што Материјалот се спечува и стврднува.

2. Брикетирање со употреба на врзивно средство. Во овој случај се употребуваат различни видови врзивни средства: органски и неоргански. Најчесто се употребуваат разни видови смоли и катрани, цемент, водено стакло, магнезиум хлорид, гипс, вар и др.

Производството на брикети се состои од неколку последователни операции, од кои најважни се: подготовката на рудите, смесувањето и пресувањето. Подготвувањето на рудите опфаќа: мелење, сушење и навлажнување на рудата до бараниот

оптимален процент на влага. Мелењето е неопходно, бидејќи здрави брикети се добиваат само од многу ситни хомогени руди. Смешувањето има за цел да ја хомогенизира основната рудна смеса, пред да се изврши брикетирањето.

ФорКаменеца на брикетите може да биде различна. Обично по пресувањето брикетите треба да отстојат извесно време во покриено складиште, додека да ја добијат својата конечна цврстина.

Во зависност од методот на брикетирање и неопходниот притисок на пресување, во пракса се користат најразлични конструкции на преси за брикетирање: со валјаци, со ударно дејство, со пиштоли, престеновидни, хидраулични, со пресување од една или две страни и др.

1.2.2. Пелетизирање

1.2.2.1. Карактеристики на суровините за пелетизирање

а) Гранулација на суровините

Големината на честичките на дадената суровина претставува една од почетните точки при определувањето на постапката за нејзината преработка. Утврдувањето на горната граница на крупноста на честичките над која постапката за синтерување е поекономична, било предмет на многу испитувања.

Во табела 1 се дадени карактеристични анализи на сеење кои д-р Курт Маер (Лурги) ги наведува како најповолни за синтерување, односно пелетизирање.

Табела 1. Најповолни анализи на сеење на ситнозрнести суровини

Остаток на сито во мм.	З р н е т о с т %	
	Синтерување	пелетизирање
10,0	4,1	-
8,0	2,3	-
3,0	11,7	-
1,0	7,0	-
0,5	27,1	-

0,3	18,1	-
0,15	20,3	0,4
0,09	2,1	11,6
0,075	4,1	н.п
0,060	3,1	11,3
0,060	-	76,7

Значи, Материјалот за пелетизирање не треба да има зрна покрупни од 0,15 mm, а треба да содржи 90 % зрна под 0,075 mm. Меѓутоа, ваквото барање не важи за сите суровини и некое фиксирано правило во поглед на горната граница на големината не може да се постави. Знаењето на факторот гранулација на суровината произлегува и оттаму што поврзувањето на честичките на рудата во топченца при пелетизирањето се врши со незначително учество на механичките сили, а главно врзувачко дејство врши водата. Доколку честичките имаат поголема кvasлива површина и сврзувањето е поголемо. Значи, колку долната граница на гранулацијата (која не се поставува) се приближува повеќе до нула, толку поуспешно се спроведува пелетизирањето.

Успешно може да се пелетизира и покрупен Материјал. На пр., постигнати се добри резултати при пелетизирање на прашина од високата печка која може да има околу 20 % зрна покрупни од 0,5 mm, а само околу 30 % зрна со големина под 0,15 mm.

Можеме да заклучиме дека некои особини на Материјалот за пелетизирање можат да ги компензираат недостатоците поради недоволната иситнетост.

б) Облик на надворешната површина на основните честички

На ефикасноста на пелетизирањето, т.е. на механичкото вклопување на одделните минерални честички при образувањето пелети големо влијание има и обликот на надворешната површина на основните честички. Поволен е неправилен облик на

честичките – иверест и кукаст. Концентрати кои имаат јасно светликав плочест облик, како и оние со валчести честички, тешко можат да се пелетизираат. Тешкотии при пелетизирањето прават и некои видови пирити изгоретини, особено оние кои биле во директен допир со пламен. Кај тој Материјал дошло до заоблување на рабовите, а е потребна рапава површина на честичките.

в) Квасливост на суровината и нејзината зависност од површинскиот напон на водата како врзувачко средство

Квасливоста е една од природните особини на Каменецеријата. Се карактеризира со аголот на квасење. За практични цели тој може да се одреди со мерење на времето потребно слој од дадена суровина да се накваси до одредена длабочина. Пред пелетизирањето се бара суровината да има добра квасливост, за да може поврзувањето на зрната во топче полесно и подобро да се изврши.

Врзувачкото дејство на водата се засновува на нејзиниот површински напон, односно на вишокот слободна енергија на границата на течната и цврстата фаза. Според тоа, зголемувањето на површинскиот напон на водата со додавање неизвесни површински неактивни Каменецерији би одело во прилог на зголемувањето на врзувачкото дејство на водата. Но, од друга страна, зголемувањето на површинскиот напон на водата стои во спротивност со квасливоста на суровината, па резултантата на овие два фактора не мора да доведе до битно подобрување.

Површинскиот напон на водата може да се зголеми само на штета на квасливоста на суровината.

г) Водата како средство за врзување

Пелетизирањето се врши на следниов начин:

Две допирни капки се сврзуваат во една под дејство на силите на површинско напрегање. Две честички на руден концентрат, обвинени со тенка водена мембрана, под дејство на истите сили и под дејство на механичките сили при вртењето, се

соединуваат со образување една заедничка водена мембрана. Притоа се формираат ситни зародиши – јадра на идните пелети. Понатаму, во самиот процес дел од влагата на концентратот се ориентира на површината на пелетите и така се создава можност врз оваа површина да има нови честички Материјал. Со тоа се остварува непрекинато нараснување на пелетите.

Количината на вода при формирањето пелети треба да е строго определена. Таа е различна за разни видови суровини. По пат на емпирија се одредува толкава количина вода колку што е потребно за да се обезбеди постојано меѓусебно слепување на рудните честички. Помалиот процент на вода го забавува растењето на пелетите и создава баласт од прашина во уредот за пелетизирање. Прекумерната количина на вода доведува до создавање мил и разурнување на веќе создадените пелети. Вишокот вода образува водна мембрана која го обвива пелетот и менискусите на течноста во капиларите исчезнуваат, што доведува до исчезнување на јакоста на пелетот. Оптималниот процент на вода зависи од степенот на иситненоста на суровината и нејзините физички особини. За поврзување крупни зрна треба повеќе вода отколку за поситни. За компактни суровини потребниот процент на вода е помал отколку за порозни и шупливи. Ова се објаснува со тоа што кај порозните суровини дел од водата се впира во внатрешноста на зрната и не дејствува на нејзиното врзување. За чисти железни концентрати оптималниот процент на вода изнесува 6 – 10, за мешавина од 50 % концентрат и 50 % пиритни изгоретини околу 14 %; а за грлена површина овој процент е и 20, бидејќи таа е прилично порозна.

За успешно пелетизирање влажноста на концентратот треба да е 3 – 5 % пониска од оптималната влажност на пелетите.

Големо влијание врз процесот на образување пелети има и начинот на додавање на водата. За да се образуваат зародиши на пелети, неопходно е да се додава тенка струја на вода врз слој на концентрат. За растење на пелетите е неопходно површината да им се навлажнува со вода.

д) Додатоци при пелетизирањето

При самиот процес на пелетизирање, секако, најосетлива е манипулацијата со суровините, а уште повеќе со сушените пелети, пред печење. За да можат влажните пелети да го издржат транспортот и загревањето при печењето, неопходно е да имаат доволна отпорност на притисок, на паѓање, на удар, на абење, како и да го издржат брзото наголемување на температурата. Се смета дека влажните пелети се доволно јаки ако се со пречник од 16 mm, ако издржат притисок од 0,9 kg и ако не се распаѓаат при паѓање од висина од 6 до 9 m.

За зголемување на цврстината на суровите пелети, при пелетизирањето на концентратот му се додаваат разни додатоци.

Разликуваме две групи додатоци:

- првата група ја прават органските Каменецирии, како: скроб, декстрин и др.
- во втората група спаѓаат цврстите или растопените аноргански Каменецирии: CaCl_2 , CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaCl , Na_2CO_3 и бентонит.

Органските додатоци поволно влијаат на цврстината на суровите пелети, но при сушење тие изгоруваат. Додавањето сиромашни руди со поголем процент на Al_2O_3 поповолно влијае на цврстината на суровите и сушените пелети, а неповолно на цврстината на печените пелети. При пржењето (печењето) на таквите пелети доаѓа до врзување на честичките преку трската од јаловината, а таа врска е послаба од врската настаната со синтерување на металните честички.

Бентонитот кој е, всушност, глина со 20 – 25 % Al_2O_3 и 60 – 65 % SiO_2 , денес најчесто се користи како средство за врзување во количина од 0,25 до 1,5 %. Се испитува и производството на пелети со органски средства за врзување, а посебно со вар и варовник за добивање самоодни пелети. Во Шведска како средство за врзување се употребува FeSO_4 , CaCl_2 , или FeSO_4 со $\text{Ca}(\text{OH})_2$ во просек од 0,4 % Fe_2SO_4 и 1,0 % $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

1.2.2.2. Уреди за обликување

Производството на пелети се состои, главно, од следниве четири последователни операции:

1. добивање сурови пелети,
2. сушење на пелетите, 300 – 600 °C,
3. печење на сушените пелети, 1100 – 1200 °C,
4. ладење на пелетите, 300 – 100 °C.

Сушењето и печењето имаат за цел да ја наголеат механичката цврстина на пелетите за да се избегне распаѓањето во печките. Во индустриски размери за тие операции се употребуваат различни постројки на различни места.

Првата операција, добивање сурови пелети, може да се изврши во три различни постројки: во барабани, во чинии и во конусни гранулатори, кои во последно време добиваат сè поширока примена при окрупнувањето на ситните железни концентрати.

Суровите пелети се сушат и се печат во шахтни печки или агломерациони машини, при постепено зголемување на температурата. При брзо загревање пелетите пукаат и се распаѓаат.

Постепено оладување на печените пелети се постигнува уште во самите печки и агломерациони машини, но за да бидат оладени на потребната температура поминуваат низ специјални оладителни постројки – бункери, ладилни ленти и др.

Формирањето на пелетите се врши на следниов принцип: кружното движење на уредот доведува до тркалање на влажните ситни зрна од руда по внатрешната работна површина на барабанот или чинијата. Поради врзувачкото дејство на водата и слабо механичкиот притисок предизвикан од центрифугалната сила на инерција доаѓа до окрупнување – поврзување прво само неколку зрнца, во едно покрупно зрно – јадро. Во агрегатот се додаваат континуирано нови количини на руда и вода, така што

работната површина секогаш е покриена со тенок слој навлажнет концентрат. Со тркалање на јадрото по тој слој, на нив непрекинато се налепуваат нови честички, правејќи концентрични слоеви и на тој начин јадрата растат и се образуваат пелети.

Процесот на образување јадра е релативно најбавен, па во пракса се работи најчесто со однапред подготвени јадра. Со тоа се влијае на брзото растење на пелетите до потребната големина. Кога пелетите се произведуваат со цел за примена во висока печка, за јадрата обично се зема одреден процент на ситен кокс со големина од 1 до 3mm.

- *Барабан за пелетизирање*

Барабанот како постројка за пелетизирање првпат бил употребен во 1913 г. Ни до денес работата со барабан не е многу изменета. Тој денес најмногу се употребува во САД и Шведска.

На сл. 1.10 е прикажано образувањето на сурови пелети во барабанест пелетизатор. Барабанот е челичен цилиндар делумно отворен на двата краја. Железниот концентрат влегува континуирано во горниот крај на барабанот, кој е слабо наклонет и се врти со определена брзина.

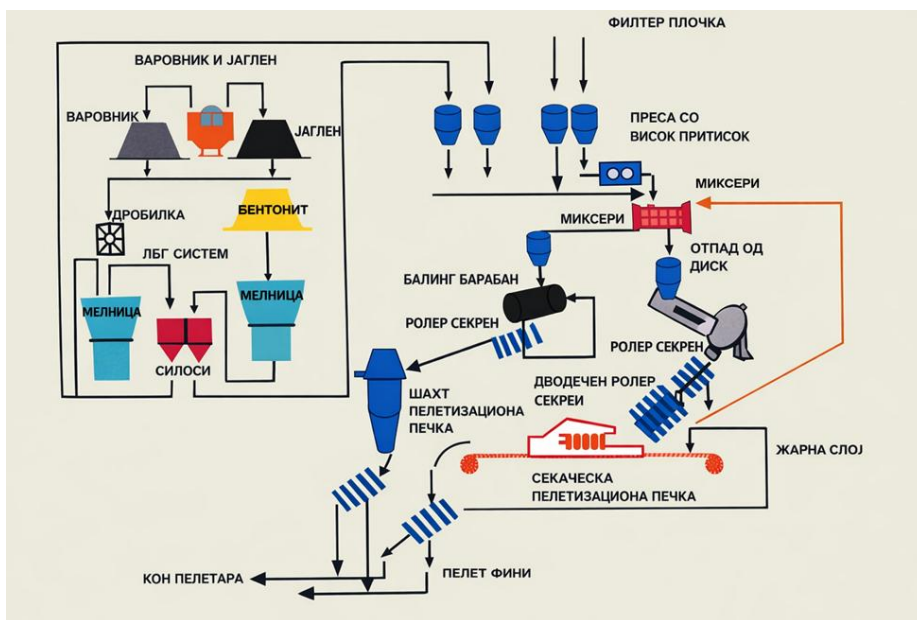


Слика 1.10. Барабанест пелетизатор

Поради вртењето од концентратот прво се образуваат мали топченца, кои тркалајќи се по внатрешната површина постепено растат. Додавањето вода или евентуално додавањето стопено врзувачко средство се врши преку фини нарушувачи внатре во барабанот. Во последната третина се вртат образуваните пелети, со што се постигнува нивна поголема цврстина.

За симнување на предебелите лепенки по сидовите на барабанот и за одржување на рамномерен слој од Материјалот на внатрешниот сид од барабанот, се поставува нож во различна изведба.

Еден електромотор, преку запчест преносник, го врти барабанот околу неговата подолга оска. Наклонот на барабанот обично е $2 - 5^\circ$. Должината треба да биде 2,3 – 3,0 пати поголема од пречникот.



Слика 1.11. Шема на движењето на пелетите при нивно образување во барабанест и чиниест пелетизатор

Нараснатите, до бараната големина, пелети на долниот крај на барабанот се префрлаат преку еден праг и во систем од сита се сортираат по големина. Во различни заводи тоа сортирање се

врши на различен начин. На пр., во САД за високи печки се искористува фракција од 10 до 20 mm. Шведските заводи им даваат предност на пелетите од 25 до 38 mm. Сообразно на тоа, суровите пелети кои излегуваат од барабанот се сортираат на три фракции. Најситната фракција се враќа во барабанот за да окрупне, а најкрупната се дроби и се смешува со свежиот концентрат.

Разбирливо е дека капацитетот на барабанот не зависи само од неговите димензии, туку најнапред од карактеристиките на суровините кои се пелетизираат во него.

Од брзината на вртењето и од наклонот на барабанот зависи големината на произведените пелети. Со поголема брзина на вртење и со поголем наклон се забрзува продукцијата, но се добиваат поситни пелети.

- *Чинија за пелетизирање*

Во чиниите за пелетизирање, пелетите се образуваат речиси по логичен начин како во барабанестите пелетизатори, со таа разлика што при окрупнувањето се тркалаат не само по цилиндрична туку и по коса површина и при тркалањето опишуваат цилиндрични криви.

Пелетизирањето на чиниест гранулатор е попросто и поевтино отколку она во барабанест гранулатор. Со промената на аголот и брзината на вртењето, од иста чинија можат да се добијат, по желба, пелети од најразлична гранулација.

Чинијата за пелетизација е обична тава со висок венец, централно прикачен на една оска и може да се врти со различна брзина. Индустриските чинии се со дијаметар 5000 – 5500 mm.



Слика 1.12. Чинија за пелетизирање

Додавањето концентрат и вода се врши во горниот дел на чинијата. Водата се додава со помош на распрскувач, а концентратот се доведува со бесконечна лента и се додава со вибрациона постројка.

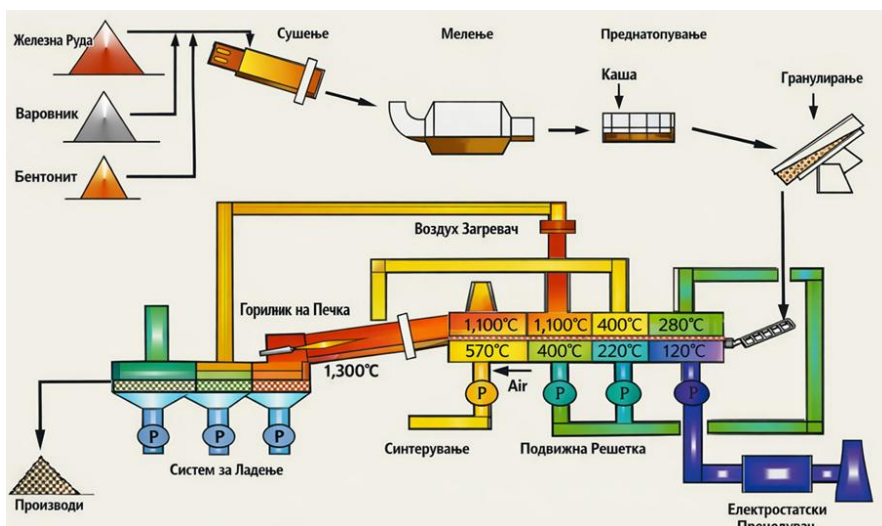
Процесот тече континуирано. При едновременно додавање концентрат и вода во чинијата прво се образуваат зародиши на пелети кои постепено растат. Готовите пелети се изнесуваат автоКаменецки со преливање преку рабовите на чинијата. Поситните пелети продолжуваат да циркулираат по целата површина на чинијата; така паѓаат повеќе пати под струја на вода и Материјал, при што се зголемуваат. Тоа води кон самокласирање на пелетите по големина.

Од аголот на наклонот при непроменет степен на полнење зависи големината на пелетите. При поголем агол пелетите пократко време се задржуваат во чинијата, т.е. порано испаѓаат преку работ и затоа се поситни.

Во иста смисла дејствува и висината на работ на чинијата. Ако е работ понизок и ако е чинијата под поголем агол, се добиваат поситни пелети. На сл. 56 се прикажани пелети со различна големина, добиени на чинија.

Чинијата во однос на барабанот има неколку значајни предности:

- попраста конструкција и помала тежина на постројката,
- можност за континуирана промена на наклонот на чинијата ($0 - 70^\circ$),
- можност за континуирана промена на бројот на вртежи,
- можност за менување на висината на венецот на чинијата,
- полесна, брза и ефикасна контрола на процесот,
- помала потрошувачка на енергија,
- најзначајна е можноста за класирање на пелетите во саКаменеца чинија.



Слика 1.13. Шема на Кобелко процес на пелетизирање



Слика 1.14. МЕРСО – постапка за сепарирање на зелени пелети

Меѓутоа, недостаток на наклонетите чинии е што при работа претставуваат неурамнотежен систем со срамно голема маса.

1.2.2.3. Печење на суровите пелети

Суровите пелети ги немаат оние механички особини кои се бараат од нормален засип за висока или електрична печка. Тие единствено поседуваат извесна минимална отпорност на притисок и паѓање која е потребна, пелетите на патот до апаратот и низ него, во кој се врши нивното оцврстување да поминуваат без оштетување.

Подобрувањето на механичките особини на пелетите до мера зависна од начинот на нивната понатамошна преработка се врши во одвоен процес – печење.

Печењето на пелети претставува процес при кој се извршува количинско и суштинско менување на површината, големината и составот на рудните честички. Тоа е предизвикано од заемното дејство на рудните честички и гасната атмосфера (Fe_3O_4 се оксидира до Fe_2O_3 при заемно дејство со кислородот од воздухот) и од гасните примеси. При печењето се зголемува контактната површина меѓу честичките во пелетите, се појавуваат нови минерали и се образуваат поголеми честички и нова структура во пелетите. Сите тие процеси условуваат значително зголемување на јакоста на пелетите. Металуршките особини на пелетите зависат во голем степен од правилно избраниот режим на печење, кој се одредува експериментално за секој концентрат.

При печењето на пелети од магнетитни концентрати се установени следниве фактори кои влијаат на зголемувањето на јакоста:

1. Оксидација на магнетитот и образување хеКаменецитни мостови кои ги сврзуваат одделните честички една со друга. Тоа оксидирање започнува при $200 - 250\text{ }^\circ\text{C}$, а протекува со доволна брзина при температура од $700\text{ }^\circ\text{C}$. Брзината на оксидирањето зависи од големината на честичките на концентратот, од порозноста на пелетите и од содржината на кислород во гасовите.

2. Рекристализација на магнетитните честички и образување поголеми заемно сврзани магнетитни кристали. Тој процес се врши при загревање на магнетитни пелети во неутрална атмосфера или при брзо загревање во атмосфера на недостиг на кислород.

3. Рекристализација на хеКаменецитот, образуван при оксидирање на магнетитот. Тој процес започнува на околу 1000 °C и завршува на крајната температура на печењето.

Главна причина за зголемување на јакоста на пелетите е рекристализација на хеКаменецитот, која се одвива со поголема брзина од реакцијата на магнетитот.

Можен е уште еден тип врска, троскина врска, која се јавува при високи температури на печење, при кои се растопуваат глинестите примеси, се образува железосиликатен или друг вид раствор. При појавата на течна фаза – троска, рудните зрна се обвиваат околу неа и при оладувањето се образува троскин скелет, кој на пелетите им дава извесна јакост.

Соодветно на горните видови врски, кои условуваат зајакнување на пелетите, се избира и режимот на нивното печење.

За да можат да се употребат суровите пелети во висока печка, независно од начинот на добивањето, тие се сушат и се печат на високи температури 1100 – 1200 °C, а понекогаш и уште повисоки.

Често јакоста на пелетите се наголемува, главно, поради рекристализацијата на хеКаменецитните зрна, па затоа треба да бидат загревани до температурата на рекристализација на тие зрнца.

Сушењето и печењето на пелетите се едни од најважните операции при нивното производство, но истовремено и најосетливи. Поради малата јакост на суровите пелети, тие треба да бидат највниКаменецелно транспортирани, сушени и печени, за да не се распаднаат.

а) Шахтна печка

За најстариот метод кој веќе изумира, но сè уште се употребува во некои заводи (Шведска, САД и др.) се ползуваат шахтни печки. Една од најупотребуваните такви печки, со капацитет од 500 тони за 24 часа, претставува правоаголна шахта висока околу 9 метри. Загревањето се врши индиректно преку два загревни канала за течно гориво, од двете пошироки страни на шахтата. Одлика на шахтните печки за оксидационо жареење на пелети од понова конструкција е согорувањето на гасот не во саКаменеца печка, туку во специјални преткомори кои лежат непосредно до сидот на печката. Со врелите гасови, продукти од согорувањето, кои низ бочниот отвор влегуваат во шахтата, се доведува потребна количина атмосферски воздух за регулирање на температурата на жареење и за создавање оксидациона атмосфера. Ваквото загревање овозможува регулирање на температурата на жареење во пошироки граници.

Печката работи непрекинато. Суровите пелети се засипуваат од горниот дел преку специјален транспортер, кој ги распостелува рамномерно по напречниот пресек. Испечените пелети се спуштаат под дејство на сопствената тежина и се изнесуваат од долниот дел на печката преку косо поставените отвори за празнење.

Сушењето и печењето на пелетите се одвива продолжително едно по друго во погорните зони каде се воведуваат димните гасови од горивото. За регенерирање на топлината, во спротивен правец од движењето на пелетите се дува ладен воздух, кој ги оладува пелетите а самиот се загрева. Еден дел од топлиот воздух се употребува за сушење, а друг за запалување на течното гориво.

На таков начин се постигнува повисока температура на горењето и постепено искушување, загревање и ладење на пелетите и рационално се искористува топлотната способност на горивото. Меѓу другото, треба да се запазат и следниве услови:



Слика 1.15. Шахтна

Зоната на печење пелети треба да се наоѓа, по можност, во погорните слоеви на печката. За таа цел суровите пелети не треба да се насипуваат во многу дебел слој, бидејќи испарената вода од долниот дел ќе се кондензира во горниот дел и ќе предизвика омекнување, деформација и следување на пелетите. Освен тоа,

дебелиот слој влажни пелети налегнува со поголема тежина врз испушените пелети и може да ги деформира.

1. Столбот на испечените пелети треба да биде што повисок за да можат да се оладат од 150 до 100 °C.

2. Температурата во зоната на печењето треба да биде повисока.

3. За да се добијат еднакви по состав и особини пелети, температурата во зоната на печењето треба да биде постојана по целиот слој. Тој услов тешко може да се запази, бидејќи употребените димни гасови за затворање не се распределуваат рамномерно по напречниот пресек на столбот од пелетите, но се движат, по линијата на најмал топор, покрај ѕидовите и низ покрупната фракција. Поради тоа настануваат неизбежни локални прегревања, кои можат да предизвикаат омекнување и залепување на пелетите и да го отежнат нивното рамномерно спуштање. За отстранување, раскршување на блоковите од спечени пелети, шахтните печки се снабдени со специјални уреди со назабени валјаци. При нормална работа на печката количината на залепените пелети е под 5 %.

б) Конвеерна машина за печење пелети (Двајд-Лојд лента)

При преработка на концентрат со многу мала температурна разлика меѓу точката на синтерување и точката на омекнување, најтешко е да се спроведат пелетите низ печката за печење без да дојде до нивно спечување. Во тој случај подобро е да се пржат на синтер-лента каде е можна подобра контрола на температурата и каде има подобар состав на гасовите во сите зони по должината на целата лента.

Конвеерната машина за печење пелети е речиси иста со Двајд-Лојд лентата за агломерација. Главната разлика меѓу нив е што при машината за печење пелети огништето за запалување е заменето со една трикоморна печка, а вакуум коморите се приспособени за рекупирање на топлината на излезните гасови, кои се добиваат при печењето и ладењето на пелетите. Освен тоа, простирањето на мокрите пелети врз решетката е мошне

упростено. Тие се додаваат на лентен транспортер во еден вибрационен засипувач кој ги распостелува рамномерно по постелната површина на машината во дебелина од 35 до 40 см. Но, врз решетките обично претходно се нанесува друг засипувач слој – постелка од поситни пелети.

Потребната топлина за печење се добива или од согорувањето на ситно тврдо гориво (со кое влажните пелети се налепени по површината уште при нивното излегување од гранулаторот) или од димните гасови на едно специјално огниште за течно или гасно гориво.

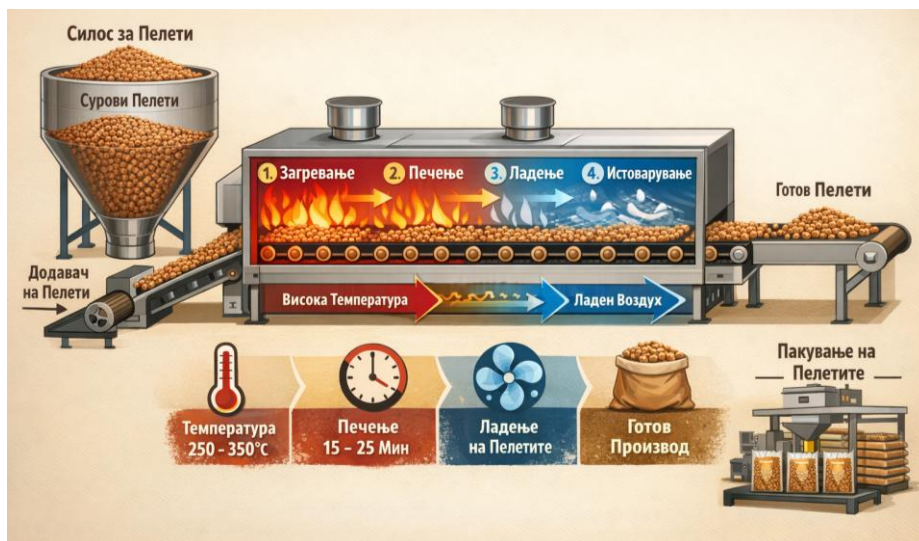
Освен пелење на висока температура, во опишаната машина се врши и истовремено сушење на суровите пелети и ладење на печените пелети. Поради тоа таа е разделена на неколку зони, во кои протеуваат еден по друг разните процеси. На сл. 58 шеКаменецски се претставени тие зони, со укажување на процесите во нив и движењето на гасовите и пелетите.

По постелувањето врз решетката, влажните пелети преминуваат најнапред низ зона на потсушување, каде со вакуум пумпа се просисува топол воздух, кој излегува од зоната на првото оладување. Во тој случај, ако воздухот не е доволно топол, се предвидува дополнително загревање.

Во следната зона (2), во која движењето на гасовите е во обратна насока (од горе надолу), пелетите конечно се исушуваат, се подгреваат и се запалуваат (ако се замесени со тврдо гориво). Неопходната топлина за ова се добива од гасовите кои излегуваат од зоната на печење.

По поминувањето низ таа и следната зона каде ја добиваат својата крајна јакост, пелетите доаѓаат во зоната на претходно оладување и оттаму во зоната на конечно оладување, од каде ја напуштаат машината. Оладувањето се врши со просмукување на ладен воздух низ слој топли пелети. Излезниот загреан воздух од зоната на претходното оладување, чија температура достигнува до 500 °C, се користи за прво сушење на влажни пелети. Топлиот

воздух од конечното оладување се испушта од атмосферата поради ниската температура.



Слика 1.16. Шема на зоните и процесите во една конвеерна машина за сушење и печење пелети:

Готовите пелети се транспортираат со помош на транспортни ленти во складишни бункери.



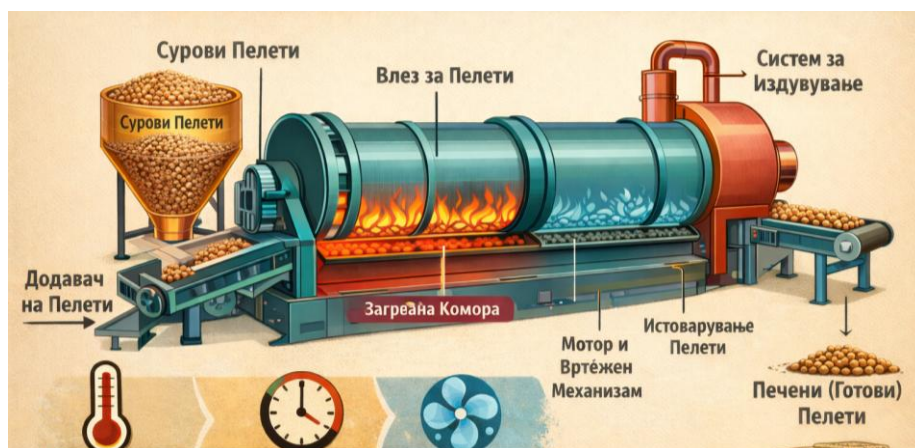
Слика 1.17. Конвеерна машина за сушење и печење пелети

Познати се неколку вида машини, односно ленти, кои се разликуваат по конструкцијата, начинот на движење на гасовите, искористеното гориво, доводот на воздух при сушењето, пржењето на зелените пелети, како и нивното ладење.

в) Лентесто ротациона печка

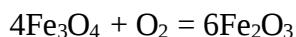
Тоа е комбинација меѓу конвеерна машина и ротациона печка. Прикажана е на сл. 1.17. Технолошкиот процес се одвива по следнава шема:

Добиените сурови пелети се нанесуваат врз решетката во слој со дебелина од 20 см. Поминувајќи низ одделението за сушење а потоа и низ одделението за загревање се загреваат на температура од 800 до 900 °C. За ова претходно загревање и сушење се употребува топлината од високотемпературните оксидациони димни гасови од ротационата печка, кои се процицуваат низ слојот на пелети.



Слика 1.18. Ротациона печка за печење пелети

Кога пелетите се добиени од магнетни руди, поради оксидациониот карактер на тие гасови, во одделението за претходно загревање започнува да се врши следнава реакција:



Поради рекристализацијата на добиениот железен оксид, отпорноста на пелетите се наголемува на 45 – 90 kg/cm³ и тие

потоа можат да бидат загревани во ротационата печка без опасност од распаѓање при вртењето на печката.

При преминувањето на пелетите во ротационата печка, тие се сеат и се очистуваат од ситнежот. Во таа печка тие ја добиваат својата конечна јакост при загревање на 1200 – 1250 °C. Ротационата печка може да биде загревана со тврдо (јаглороден прав), течно или гасно гориво.

Поради вртењето и наклонот на печката, пелетите се движат постепено кон нејзиниот долен крај, од каде се прифаќаат во еден вертикален разладувач и се оладуваат со продувување со студен воздух. Топлината на тој начин се регенерира, а овој воздух се употребува за согорување на горивото во саКаменец ротациона печка.

Од разладувачот пелетите излегуваат обично со температура од околу 180 °C и во таква состојба, откако ќе се отсее ситната фракција, која не надминува 1 – 5 %, се носат во печка за топење.

1.2.2.4. Оценка на квалитетот на пелетите

Пелетите, добиени од железна руда, кои ќе се применуваат во висока или електролачна печка, мора да одговараат на одредени барања во поглед на нивните механички и хемиски особини.

Кај суровите пелети најчесто се одредуваат нивните механички, а кај печените – механичките и хемиските особини. Не можат да се постават некои фиксирани норми за најповолни механички особини на суровите и печените пелети кои ќе бидат општи и ќе важат во секој случај. Бројот и разновидноста на оптоварувањата кои суровите или жарените пелети треба да ги претрпат ќе зависат од одбраниот начин, организација и локацијата на погонот за пелетизирање, како и од начинот на понатамошната преработка на жарените пелети.

а) Одредување на механичките особини на суровите пелети

Кај суровите пелети се испитува отпорноста на притисок и паѓање. Отпорноста на суровите пелети се зголемува со зголемување на процентот на глинести компоненти во составот на рудата, како и со додавање врзувачки средства. Отпорноста на паѓање на влажните пелети е потребна поради утврдување на нивното однесување при транспортирањето до уредите за сушење и печење. Зелените пелети треба да издржат оптоварување на притисок од преку 1 kg.

б) Одредување на механичките особини на печените пелети

Кај печените пелети се испитува отпорноста на притисок. Во случај да се употребуваат во висока печка, им се испитува отпорноста на паѓање, а на ниско печените пелети им се испитува отпорноста на абење. Отпорноста на притисок расте со температурата. Цврстината на пелетите зависи, исто така, и од брзината на нивното ладење. Доколку е ладењето побрзо таа е помала, што се објаснува со порастот на внатрешните напрегања при нагло ладење. Отпорноста на притисок на жарени пелети, наменети за употреба во висока печка, треба да изнесува 180 – 200 kg. Во случај пелетите да трпат поголем број претоварувања и лагерувања, овој број е уште поголем.

Испитувањата на отпорноста на паѓање се вршат главно кај пелети наменети за висока печка.

Кај ниско жарените пелети се испитува и отпорноста на абење. Пелетите жарени над 1200 °C имаат висока отпорност на абење.

Битни физички особини на пелетите се: специфичната тежина и големината. Специфичната тежина зависи од концентратот, а големината од иситнетоста и природните особини на концентратот, како и од начинот на пелетизирањето. ПоголеКаменеца специфична тежина и поголемиот пречник на пелетите треба да обезбедат нивно полесно продирање низ слојот на троска.

в) Одредување на хемиските особини

Хемискиот и минералошкиот состав на пелетите зависи од видот на концентратот и количината на употребеното средство за врзување на додатоците.

Жарените пелети за високи печки се испитуваат на нивната редукциона способност. Редукцијата се врши во струја на водород при 850 °C. Пелетите имаат поповолна редуктивност од синтерот од ист концентрат. Се смета дека подобрата редуктивност произлегува од тоа што жарењето на пелетите се изведува на пониска температура.

Освен тоа, со испарување на средствата за врзување на пониски температури во пелетите настануваат правилно распоредени пори, кои во таква мера не можат да се постигнат со синтерување.

1.2.2.5. Предности на пелетизацијата

1. Се постигнува рамномерен гранулометриски состав на пелетите. Валчестата форма овозможува рамномерна дебелина на секој слој од пелетите по пресекот на високите печки. Тоа овозможува услови за рамномерно распределување на гасовите и подобар контакт меѓу гасовите и засипот.

2. Подобрата гасна пропустливост го интензифицира одот на печката. Користењето пелети овозможува да се зголеми температурата на воздухот без да се наруши рамномерниот од на печката.

3. Пелетите се транспортираат полесно од агломератот.

4. Во инсталациите за производство на пелети има можност за оперативно регулирање на процесот на печење по зони и за создавање неутрална, оксидациона или редукциона атмосфера. Тоа е можно поради користењето на само гасно или само течно гориво.

5. Во конвеерните машини за производство на пелети се создава можност за повторно искористување на топлината од вжештените гасови. Со тоа се постигнува повисок коефициент на

искористување на топлината, приближувајќи се до коефициентот на полезното дејство на шахтната печка.

Сите наведени предности доведуваат до следниве последици: се интензифицира одот на високата печка, се смалува потрошувачката на кокс и се зголемува производството на печката.

1.2.2.6. Недостатоци на пелетизацијата

1. За успешно пелетизирање е неопходно дисперзноста на концентратот да биде во определени граници, кои во некои случаи наложуваат дополнително мелење на концентратите.

2. Неопходно е да се користат специјални машини за добивање јаки влажни пелети, како и поголемо внимание при транспортирањето и насипувањето врз решетката на конвеерната машина.

3. Печењето на пелетите е посложен процес од агрегирањето. Успешното печење бара строго запазување на определен температурен режим. Нарушувањето на тој режим предизвикува пукање на пелетите или слепување при загревањето до максимална температура.

4. При печењето на пелетите се постигнува понизок степен на десулфуризација во однос на агрегацијата.

1.2.3. Агрегација

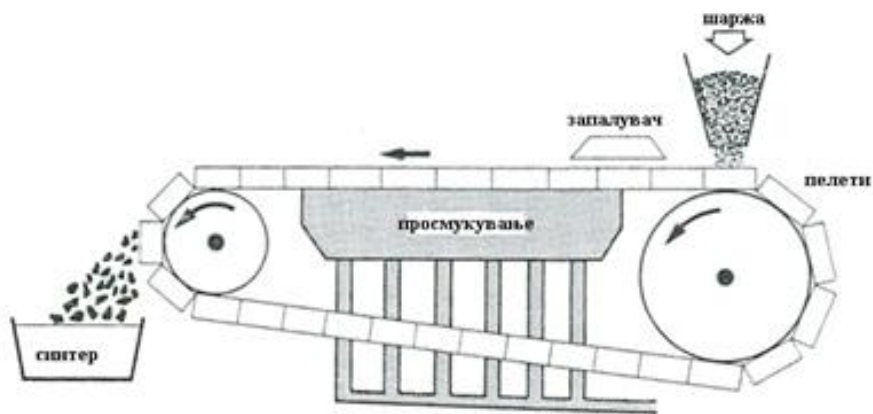
Еден од трите основни начини за укупнување на ситните железни руди и концентрати е агрегацијата. Може да се каже дека таа е и најчесто применуваниот метод за укупнување.

Агрегациониот принцип (спечување со просмукување на воздух) е откриен во втората половина на 19 век. Најпрво, овој процес се употребувал во обоената металургија. Идејата да се агрегира железна руда со прашина од висока печка наоѓа своја практична примена од 1900 г. Силен напредок е направен со пронаоѓањето на Двајд-Лојдовата агрегациона машина која работи континуирано. Првата ваква машина била употребена во

САД во 1910 г. Стационарните постројки за агломерирање со прекинато дејство (агломерационите чаши и тави), кои се применувале претходно, не можеле да се наметнат поради нивниот мал капацитет. Најширока популарност добиле Гринвалдовите тави, по името на Гринвалд (САД).

Бурниот развој и сè почестата примена на агломерациониот процес се последица на низа нови технички усовршувања: зголемување на работната површина на агломерационите машини, добивање самооден агломерат, интензивирање на процесот, ладење и сеење на агломератот, зголемување на количината на просмуканиот воздух, користење комбинираано гориво и др.

Агломерациониот процес се состои од следново: ситната руда или руда и концентрат се смешуваат добро со ситен кокс и се навлажнуваат. При смешувањето и навлажнувањето Материјалот добива зрнест карактер и станува гасопропустлив. Пригответниот Материјал се насипува врз решетката на агломерационата машина во слој од 200 до 300 mm.



Слика 1.19. Двајт-Лојдова машина за синтерување

Со помош на специјална машина за запалување – огниште, се запалува горивото во Материјалот и започнува просмукување на воздухот благодарение на создадениот вакуум од околу 800 – 1200 mm воден столб под решетката. Воздухот се просмукува низ целиот слој на Материјалот, со што се обезбедува интензивно

горење на јаглеродот и развивање висока температура од 1200 до 1500 °C.



Слика 1.20. Двајт-Лојдова машина за синтерување

Започнатото горење во една тесна зона се спушта по висината на слојот на Материјалот за да се заврши на решетката. Од високата температура во зоната на топење, честичките на Материјалот омекнуваат и се спечуваат во тврди порозни парчиња – агломерат. Затопената маса се стврдува како резултат на разладувачкото дејство на просмуканиот воздух. Просмуканиот воздух создава многу пори и шуплини во агломератот, што му дава порозна структура. Значи, агломерациониот процес е метод при кој со загревање на рудата и концентратот до температура на топење и последователно ладење и стврдување, Материјалот се спечува во тврди порозни парчиња.

Добиениот готов агломерат се дроби и се сее, за да се оддели од него непечениот и трошлив дел. Делот со крупност под 12 mm се враќа на повторно спечување со другите сировини и се нарекува повраток.

1.2.3.1. Сировини за агломерациониот процес

Основни сировини за агломерациониот процес се железните руди и концентрати. Како носители на железо уште се

користат и отпадоците од металуршкото производство – прашината од високите печки и коварината и пиритните изгоретини. При производството на агломерат, поради содржината на манган, се употребува манганова руда или концентрат.

Помошни сировини во агломерациониот процес се: горивото за процесот (коксов ситнеж и антрацит) и топителот (варовник).

Втора најважна сировина во агломерациониот процес кој е носител на железо е прашината од високите печки. Гасот во високите печки носи со себе ситни честички (прашина) од руда, кокс и варовник, кои се собираат при пренесувањето на гасот во коморите од гасопрочистувачите. Значи, тоа е смеса од фини честички од руда, варовник и кокс со крупност од 0,05 до 0,3 mm. Содржината на железо е различна, но најчесто се движи меѓу 30 – 50 %. Содржината на јаглород во прашината е меѓу 4 – 12 %.

Содржината на CaO, а, исто така, и на другите оксиди, како SiO₂, Al₂O₃, MgO и др., е речиси како во составот на засипот за високите печки. Прашината од високите печки се навлажнува во агломерационите постројки, до 6 – 10 % влага. Сето ова и едноставната употреба ја прават прашината од високите печки економична за агломерационо производство.

Коварината е отпадок на валалничките погони на металуршките комбинати. Според физичкиот изглед, тоа се ситни луспи и честички, кои хемиски претставуваат речиси чист Fe₃O₄. Коварината е многу богата со железо – околу 70,0 %, а содржината на SiO₂, Al₂O₃ и др. во неа е под 1,0 %. Нејзината влажност не надминува 5,0 %. И коварината лесно се употребува во агломерациониот процес.

Пиритните изгоретини се отпадоци од пржењето на пиритот (FeS₂) при производство на сулфурна киселина. Тоа е, исто така, Материјал со црвена или црна боја и со содржина на железо меѓу 40 и 60 %. Често пиритните изгоретини содржат висок процент на сулфур – средно од 1 до 3 %, а понекогаш и

повеќе, а, исто така, содржат и благородни и обоени метали (бакар, олово, цинк, злато, сребро и др.). Тие се употребуваат направо во агломерационото производство, а со тоа и за производство на сурово железо, при што се искористуваат обоените и благородните метали; се подложуваат и на хидрометалуршка преработка за искористување на овие метали, а потоа се праќаат во агломерационото производство. Иако употребата на пиритните изгоретини во црната металургија е посложена, нивната примена сè повеќе расте, бидејќи се употребуваат во смесата за агломирање со други носители на железо.

Како гориво за агломерациониот процес најчесто се употребува ситнежот од кокс. Тој претставува отпадок, добиен при класифицирањето на крупност во самите коксарници и при неговото повторно сеење пред да се употреби во високата печка. Неговата крупност е обично 0 – 25 mm. За агломерациониот процес ситнежот од кокс треба да се дроби на многу поситни честички од 0 до 3 mm. Најважни компоненти во неговиот состав се: јаглеродот, пепелот, сулфурот, волатилите и влагата. Колку е повисок процентот на јаглерод а понизок процентот на пепел, сулфур и волатили, толку коксовиот ситнеж е попогоден за агломерациониот процес. Обично тој треба да содржи 12 – 15 % пепел, под 1 % сулфур, под 3 % испарливи Каменеџери и под 4 % влага; содржината на јаглерод е меѓу 80 и 85 %.

Како гориво во агломерациониот процес со успех се користи и антрацитот. Притоа тој се употребува во количина која го покрива недостигот на кокс. Барањата кон него се исти како и оние кон коксот.

Друга помошна суровина за агломерацијата, кога се произведува самооден синтер, е варовникот. Варовникот претставува CaCO_3 , заедно со примеси од кварц, глина, железни оксиди и др. За квалитетот на варовникот најголемо значење има процентот на CaO . Во квалитетен варовник CaO е присутен со 50 – 54 %, а $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ од 1 до 3 %. Штетни примеси (S и P)

варовникот обично содржи многу малку. За процесот на агломерирање варовникот се дроби од 0 до 3 mm.

1.2.3.2. Подготовка на рудите, варовникот и горивото

Подготовката по крупност на суровините за агломерациониот процес е многу важна операција, од која во голем степен зависи производноста на агломерационата машина и квалитетот на агломератот. Практичните испитувања поставиле определени оптимални услови. Оптималната крупност на рудите за агломерирање е од 0 до 10 mm. Крупните парчиња руда над 10 mm за време на агломерациониот процес не можат да се затопат и да реагираат. Тие остануваат во непроменета состојба и се слаба точка за ситнење на агломератот. Од друга страна, и многу ситнозрнестиот Материјал тешко се спечува. Причината тука е многу малата брзина на процесот, поради намалената гасопропустливост на шаржата. Така, додавањето ситна руда или концентрат кон извесна количина покрупна руда позитивно влијае на процесот на спечувањето, без да се намали тврдоста на агломератот. При агломерирањето на ситни железни концентрати, чија крупност е под 1 mm, додавањето руда секако е задолжително. Во спротивен случај брзината на процесот е многу мала.

Крупноста на рудата е од сушпинско значење и за ослободувањето на сулфурот (согорување на сулфурот до SO_2 гас) од агломератот, односно за намалувањето на неговата количина. Од многу крупните парчиња руда, сулфурот слабо или воопшто не се ослободува.

На рудата, а, исто така, и на сите компоненти од засипот, се прави ситова анализа. Преку неа се дава во проценти содржината на сите фракции.

Не помалку важен фактор кој влијае врз процесот на спечување и квалитетот на агломератот е крупноста на горивото и варовникот.

Од праксата и со многу испитувања е најдено дека најпогодна крупност на горивото и варовникот за

агломерациониот процес е 0 – 3 mm, со преовладување на фракцијата 0 – 2 mm. Фракцијата 43 mm, која во пракса е неизбежна, не треба да е повеќе од 5 до 8 %.

Ако горивото е крупно, тоа гори во слојот на шаржата подолго и побавно, зоната на горење се раширува и не се создава неопходната температура за стопување на Материјалот. Освен тоа, крупните зрна на горивото при насипувањето на Материјалот на агломерационата машина се издвојуваат (се третираат) во долниот дел врз решетките. Како резултат на тоа агломератот се залепува за решетките, а горивото не ја врши во целост својата функција. Многу ситното гориво, исто така, не е пожелно. Тоа ја влошува гасопропустливоста, ситните честички многу брзо согоруваат и не успеваат да ја загреат шаржата до бараната температура на стопување.

Оптималната крупност на варовникот е од 0 до 3 mm. Се условува од фактот што честичките на варовникот притоа успеваат за време на процесот најбрзо да дисоцираат и добиениот CaO брзо да реагира со засипот. Многу крупните зрна варовник, тие над 3 mm, не успеваат да се дисоцираат и реагираат целосно. Тие остануваат како бели точки во агломератот и се причина за неговото раскршување. Многу ситниот агломерат, исто така, не е пожелен. Тој ја намалува гасопропустливоста и ги влошува хигиенските услови при работата.

Отпадните суровини за агломерационото производство – пращината од високите печки, коварината и пиритните изгоретини – поради својот физички изглед, треба дополнително да се подготвуваат по крупност.

Повраток е ситниот лошо спечен агломерат и честичките од неспечената шаржа. Тој се враќа на повторно спечување. Неговата крупност е различна и зависи од крупноста на почетниот засип. Оптимална крупност на повратокот е 0 – 10 mm, како и на рудите. При спечување на многу ситни концентрати се препорачува поситен повраток: 0 – 6 mm. При покрупни руди може да се работи и со повраток од 0 до 15 mm.

Повратокот е неизбежен продукт кој циркулира при агломирањето, и има благопријатно дејство: ја растресува шаржата, ја зголемува гасопропустливоста и производноста, итн. Повратокот се одделува со сеење на агломератот непосредно по неговото излегување од агломерационата машина; исто така, и по повторното сеење, оладувањето на агломератот.

Постелката претставува претходно одделен и насипен врз решетките заштитен слој од агломерат. Улогата му е да ги заштитува решетките од предвременно оштетување. Обично, постелката е со крупност од 10 до 15 mm, но има предност порамномерната оптимална крупност од 10 до 15 mm, која подобро се насипува врз решетките.

1.2.3.3. Добивање агломерат

Во составот на агломерационата шаржа можат да учествуваат следниве компоненти:

- а) рудна смеса – неколку вида руди и концентрати,
- б) гориво – кокс и антрацит,
- в) топители – варовник, вар и др.,
- г) секундарни отпадни суровини (прашина, коварина и др.)
- д) повраток

Содржината на тие компоненти во агломерационата шаржа обично се движи во следниве граници:

■ рудна смеса	55 – 70 %
■ гориво	7 – 9 %
■ топители	10 – 30 %
■ отпадни суровини	до 10 %
■ повраток	25 – 40 %

Дозирањето на агломерационата шаржа се базира на одредени пресметувања. Основните барања при дозирањето се:

- а) т о ч н о с т – минимални отстапувања од одредениот процент или тежина на компонентите од шаржата,

б) п о с т о ј а н о с т – да нема колебање во одредениот процент или тежината на компонентите од шаржата за подолг период.

1.2.3.4. Подготовка на шаржата за агломерирање

Пред да се насипе шаржата во агломерационата машина, таа се смешува и се навлажнува.

Целта на смешувањето како технолошка операција е да се добие еднородна смеса – шаржа, која во секоја точка или област има еднаква содржина на дозволените компоненти: руда, гориво, топители и др. Со смешувањето се постигнува хемиска и физичка еднородност на шаржата, т.е. еднакво распределување на хемиските компоненти и на крупните и ситните фракции. Смешувањето се извршува во цилиндрични барабани. СаКаменеца операција може да биде едностепена и двостепена (која е посовремена и поефикасна).

Во барабаните за смешување, истовремено со смешувањето се врши и навлажнување на агломерационата шаржа. Целта на навлажнувањето е да се претвори шаржата во зрнеста, ровка и гасопропустлива маса. Шаржата се навлажнува со специјални распрскувачи. Под влијание на оваа вода, фините и ситни честички од шаржата се собираат во покрупни зрна и мали топченца. Исто така, се зголемува и порозноста на шаржата. Степенот на порозноста се движи меѓу 25 и 45 %.

Оптималната количина на влага е 8 – 9 %. Се разбира, таа зависи од карактерот на Материјалот, па затоа тој процент треба да се добие со опит. Но, при погонска работа оптималната количина на влага не смее да варира повеќе од 0,5 %.

1.2.3.5. Засипување на шаржата

Откако шаржата е подготвена за синтерување, таа се насипува на агломерационата машина. Насипувањето се врши со специјални постројки. Најпрво врз решетката се нанесува постелката, а потоа агломерационата шаржа. Насипувањето на шаржата се врши рамномерно во слој со дебелина од 20 до 30 mm. Височината зависи од тоа дали јаловината во шаржата е базна

(самоооден синтер) или не. Базната шаржа дозволува повисок слој, а сулфатната треба да се синтерува при понизок слој.

Насипниот слој треба да има еднаква височина по ширината и должината на агломерационата машина. Површинскиот слој треба да биде мазен.

1.2.3.6. Запалување на шаржата

За да започне процесот на синтерување (спечување), насипаната шаржа треба да се запали. Со запалувањето, започнува горењето на тврдото гориво. А со просмукувањето на воздухот се доаѓа до неопходниот за горење кислород.

Агломерационата шаржа се запалува со специјален уред, кој најчесто работи со гасно гориво. Соодносот меѓу гасот и воздухот во уредот за запалување се регулира автоКаменецски или рачно. Запалувањето треба да биде рамномерно по целата запалива површина под уредот.

Горниот површински слој при добро запалена шаржа е добро испечен и има металносива боја. Кога е лошо запален тој е недопечен и има црвена боја (како 'рѓа). Кога површинскиот слој е препечен, тој има стаклест сјај и тој слој од агломератот е компактен и многу слабо пропушта воздух.

Доброто запалување, освен од работата на уредот за запалување (огништето), зависи во голем степен и од влажноста и крупноста на шаржата, а, исто така, и од брзината на движењето на лентата. Повлажната шаржа се запалува лошо и површинскиот слој е слабо печен и со црвенокафеава боја. Многу крупната шаржа, исто така, се запалува лошо. Сувата и ситна шаржа лесно се препечува на површината и добива металноцрна боја. При многу брзо движење на лентата запалувањето е лошо.

Од доброто запалување зависи квалитетот на површинскиот слој на агломератот. При лошо запалување тој е крут и троплив.

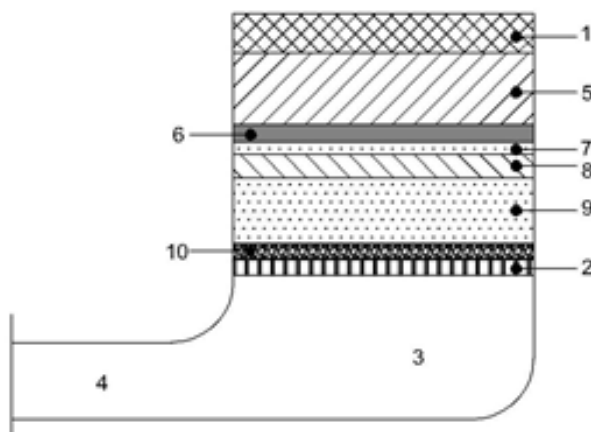
1.2.3.7. Физичко-хемиски процеси

а) Зони при процесот на агломирање

По завршувањето на агломерациониот процес, во шаржата се создаваат неколку зони. Секоја зона се карактеризира со специфични за неа физичко-хемиски процеси и појави.

На слика 1.21. е даден шеКаменецки пресек на шаржата и се означени зоните што се образуваат при еден започнат процес на агломирање.

Како што се гледа, се разликуваат шест зони: зона на постелка, зона на пренавлажнување, зона на сушење, зона на интензивно загревање, зона на горење и зона на ладење на готовиот агломерат.



Слика 1.21. Шематски пресек низ агломерациона шаржа

1.агломерат, 2. решетка, 3. вакуум комора, 4. одвод за гасовите, 5. зона на ладење на гломератот, 6. зона на горење, 7. зона на интензивно загревање, 8. зона на сушење, 9. зона на кондензација (пренавлажнување), 10. постелка.

Зоната на постелката не зема големо учество во процесот на спечување. Во неа не се содржи гориво и не настанува горење. Таа има само заштитна улога.

Зоната на пренавлажнување се одликува со повисока влажност (20 – 30 %) од оптимумот. Пренавлажнувањето во неа е

резултат на кондензирањето во студената шаржа на испарената влага од зоната на сушење.

Во зоната на сушење настанува интензивно одделување на влагата како резултат на загревањето со топлиите гасови кои слегуваат од погорните зони.

На зоната на претходно интензивно загревање се извршува подготовка на горивото за запалување под дејство на врелите гасови кои се симнуваат од погорните зони и се загрева шаржата до запалување на горивото.



Слика 1.22. Шематски е прикажан долен пресек на агрегатна машина со континуирано дејство од лентен тип

Во зоната на горење настанува согорување на горивото и формирање на агломератот, така што тоа е и зона на агломирање. Таа зона е многу тесна, има само неколку mm, и во неа се извршуваат главните физичко-хемиски процеси и промени во рудните минерали. Во неа се извршува процесот на затоплување на Материјалот, процесот на формирање и прекристализирање на новите хемиски соединенија и минерали. Од температурниот режим во зоната на горење, во голем степен се одредува квалитетот на агломератот и количината на течната фаза.

Во зоната на ладење готовиот агломерат се лади поради просмукување на надворешен ладен воздух. Во исто време се врши загревање на воздухот кој потоа оди во зоната на горење. Тука делумно протекува и секундарната оксидација на образуваниот Fe_3O_4 до Fe_2O_3 .

Положбата на опишаните зони и границите меѓу нив во процесот се менуваат непрекинато по височина. Зоната на горење се движи од горе надолу. Брзината со која зоната се пренесува од горе надолу се вика вертикална брзина на спечувањето, и таа е различна за различни руди.

Агломерациониот процес е сложен физичко-хемиски процес, кој се одвива во повеќекомпонентен систем каде за кратко време се зголемува температурата од 20 – 70 °C до 1200 – 1500 °C, а потоа пак се оладува. За тоа кратко време Материјалите поминуваат од тврда во делумно течна состојба и потоа наново отврднуваат.

Највисоката температура во процесот, температурата на агломерирањето може да се изрази како:

$$T_a = (0,8 - 0,9) \times T_t$$

Каде е:

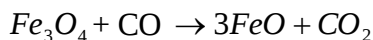
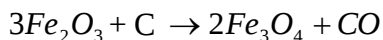
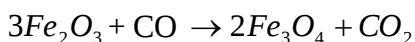
T_a – температура на агломерирање (синтерување),

T_t – температура на топење

За сето време на процесот, низ Материјалот поминува воздух и се образуваат гасови. Така, во процесот учествуваат три агрегатни состојби, или уште како се вика три фази – тврда, течна и гасовита.

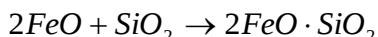
При агломерирањето во саКаменеца шаржа се одвиваат следниве процеси:

Во почетокот на процесот до температура од околу 900 °C настанува редукција на железните оксиди и образување на тврд раствор меѓу Fe_3O_4 и FeO . Таа редукција може да протекува по реакциите:



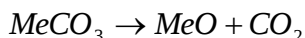
При ова, Fe_3O_4 се раствора во добиениот FeO , образувајќи цврст раствор (вустит), кој содржи 45 % FeO и 55 % и се топи на повисока температура, околу 1200 °C.

Понатаму, со зголемувањето на температурата добиениот цврст раствор на Fe_3O_4 и FeO се растопува и во системот се појавува нова фаза – течна. Во исто време FeO се сврзува со SiO_2 од шаржата и се образува соединение – фајалит:



Тоа соединение е лесно топливо, со што се зголемува количината на течната фаза.

Во температурниот интервал 500 – 900 °C карбонатите термички се разлагаат:



каде Me може да биде: Ca , Mg , Fe и др.

На високите температури добиениот CaO од дисоцијацијата на варовникот – CaCO_3 прави железо калциеви алумосиликати $\text{FeO} - \text{SiO}_2 - \text{CaO-Al}_2\text{O}_3$, кои, исто така се лесно топливи и на температура од 1035 до 1050 °C се во течна состојба.

Образуваната течна фаза е основното средство за сврзување, која го изградува скелетот на агломератот и го дава неговиот квалитет. Таа течна фаза образувана во зоната на агломирањето ги обвиткува и слепува рудните честички. Значи, таа течна фаза во процесот на агломирање ја игра најважната улога.

Потоа вака добиениот агломерат се лади, при што течната фаза преминува во тврда состојба. Притоа доаѓа до кристализација на растворите и соединенијата кои се веќе образувани во зоната на агломирањето. Кристализацијата на течната фаза протекува интензивно поради разладувачкото дејство на воздухот и поради настанокот на многу центри на кристализација. Обично, Материјалите се затопуваат делумно, па

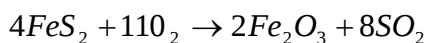
истовремено со течната фаза постои и тврда фаза од Материјалот кој не реагира и не се растопил.

На тој стадиум на ладење, во порите и шуплините на готовиот агломерат, доаѓа и до реакција меѓу тврдата и гасната фаза, при што се случува делумна оксидација на Fe_3O_4 и FeO до Fe_2O_3 .

- Отстранување на сулфурот

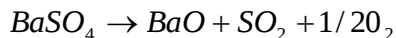
Освен окрупнувањето, целта на агломерациониот процес е и отстранување на штетните примеси – S, P, As, Sb, Zn, Pb и др. Но, при агломирањето на железните руди и концентрати, освен сулфурот, другите штетни елементи сосема малку или воопшто не се отстрануваат. Отстранувањето на штетните примеси зависи од нивниот вид, хемиската форма во која се наоѓаат и од условите на агломерациониот процес.

Сулфурот во суровините се наоѓа во форма на сулфиди – FeS_2 , FeS , CuS , ZnS , CuFeS_2 и сулфати – BaSO_4 , CaSO_4 , MgSO_4 . Докажано е дека сулфидниот сулфур полесно се отстранува од сулфатниот. На пр., сулфидниот сулфур може да се отстрани 92 – 95 %, а сулфатниот при обични услови не се отстранува повеќе од 50 – 60 %. Сулфурот од сулфидите се отстранува при не така високи температури, од 500 до 1000 °C, и при голем вишок на воздух:



При оваа реакција се ослободува голема количина на топлина.

Разлагањето на сулфатите се врши при високи температури, над 1000 °C, и притоа се троши топлина:



Оваа реакција бара и подолго време на загревање, услов кој при агломерациониот процес е малку застапен.

Освен од температурата, а со тоа и од количината на горивото, отстранувањето на сулфурот зависи и од крупноста на

Материјалите, од количината на просмуканиот воздух, од висината на слојот, од видот на различните додатоци и др.

Со други зборови, брикетирањето и агломерацијата на ситните Материјали во основа се базира на процес на синтерување – механизам каде што зрната на Материјалот при повишена температура во голема мера омекнуваат (меѓутоа не се топат) и при тоа се слепуваат.

1.3. Подготовка со промена на хемискиот состав

• Процес на пржење

Во досегашното излагање беа дискутирани методите за обогатување на минералните сировини каде што тие претрпуваат само физички промени, на пр., при дробење, сеење, магнетна или флотациона сепарација, но не претрпуваат никаква хемиска претворба.

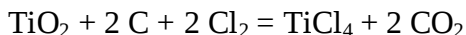
Изборот на постапка (метод) за обогатување на сировините зависи од конкретната сировина, целта на подготовката (припреКаменеца), односно технологијата на нејзин понатамошен третман, сè до добивање финален производ: метал или метални Материјали, на пр., олово, цинк, челик, феролегури итн. Заедничкото име на методите за обогатување и подготовка во кои сировината го менува хемискиот состав е „пржење“. Процесот на пржење се одвива на повишени температури (пирометалуршки процес).

На поимот пржење се додава хемискиот карактер, односно хемиската промена на сировината во процесот на пржење. Најчести видови пржења во металургијата се:

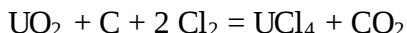
- а – оксидационо, со вишок на воздух;
- б – редукционо, со недостиг на воздух;
- в – сулфатационо, преминување на сулфидите во сулфати;
- г – хлоридно, во хлорна атмосфера;
- д – пржење со испарување, и др.

1.3.1. Хлоридно пржење

Хлоридното пржење е процес во кој металот во рудата се преведува во некое хемиско соединение кое содржи хлор, на пр., хлорид. Овој вид на пржење се применува во случај кога се образува метален хлорид со ниска температура на топење, така што течниот продукт понатаму со испарување лесно се екстрахира од јаловината. На пр., сиромашните сировини на титан се пржат со хлор во присуство на јаглерод, при што се образува $TiCl_4$:



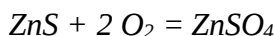
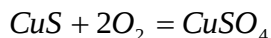
Образуваниот продукт TiCl_4 при собна температура е стабилен во течна состојба. Хлоридно пржење се применува и за концентрација на ураниум од сиромашни руди:



Образуваниот UCl_4 се топи при 590°C .

1.3.2. Сулфатационо пржење

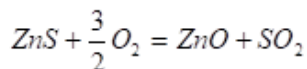
Сулфатационо пржење е процес во кој корисниот метал се преведува во сулфат. Овој процес на подготовка на суровината се применува во случај кога сулфатот на корисниот метал има висока или многу повисока растворливост во вода од останатите примеси, па на тој начин со растворање на сулфатот во вода се издвојува, односно се екстрахира од (во вода) нерастворливата јаловина. На пример, овој процес често се користи при обогатување на сулфидните руди:



Во горните примери со сулфатационо пржење на сулфидна бакарна, односно цинкова руда се образуваат CuSO_4 и ZnSO_4 . Овие соединенија се лесно растворливи во вода, односно имаат висока растворливост во вода, т.е. многу повисока од примесите (јаловината) во рудата.

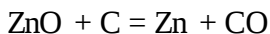
1.3.3. Оксидационо пржење

Оксидационо пржење е процес во кој корисниот метал се преведува во оксид, односно хемиско соединение кое е погодно за натамошно процесирање до добивање метал. Овој процес се



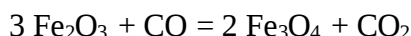
користи при екстракција на металите од сулфидни руди. На пример:

Образуваниот ZnO понатаму се редуцира со редуцент, на пример, кокс до Zn по следната хемиска реакција:

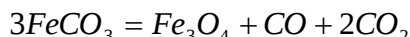


1.3.4. Магнетизирано пржење

Магнетизирано пржење се применува во случај кога корисниот минерал може да се преведе во соединение кое поседува магнетни својства погодни за магнетна сепарација. Овој метод најчесто се користи за обогатување на железните суровини. Целта во овој процес е да се образува соединение Fe_3O_4 (магнетит), кое поседува магнетни својства. На пример, минерал хеКаменецит, Fe_2O_3 во атмосфера на CO (редукциона атмосфера) се пржи до Fe_3O_4 по хемиската реакција:



Минерал сидерит, FeCO_3 може, исто така, да се преведе во Fe_3O_4 по хемиската реакција



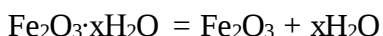
1.3.5. Калцинационо пржење

Калцинационо пржење е процес кој се користи за разложување (дисоцирање) на карбонатите присутни во суровината. Овој процес, на пр., за карбонат на двовалентен метал MeCO_3 се одвива по следниот хемизам:



Во овој процес, како што се гледа од горната хемиска реакција, од карбонатот се ослободува гасот CO_2 . Присуство на карбонати во шаржата кај пиromеталуршките процеси се избегнува поради тоа што ослободениот гас CO_2 го зголемува притисокот на гасната атмосфера во топилничкиот агрегат, па како последица на тоа може да дојде до некакво негово оштетување (хаварија). Поради тоа дисоцијацијата на карбонатите во процес на калцинационо пржење се реализира надвор од топилничките агрегати. Така, на пример, ако во шаржата за некој пиromеталуршки процес во својство на топител се користи CaO или MgO , тогаш тие претходно се приготвуваат со калцинационо пржење на варовик (CaCO_3) или доломит ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), па потоа се додаваат во шаржата.

Освен горните процеси, во пиromеталургијата (металуршки процеси кои се одвиваат при повишени температури) се одвива и процес на дехидратација, односно разлагање на хемиски врзаната вода (кристална вода, односно вода вградена во кристалната решетка на минералот) во минералите. Така, на пр., минералот на железото – лимонит, со хемиска формула $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ при загревање претрпува хемиска промена во која дехидрира, односно ја губи кристалната вода по хемиската реакција:



1.3.6. Пржење со испарување

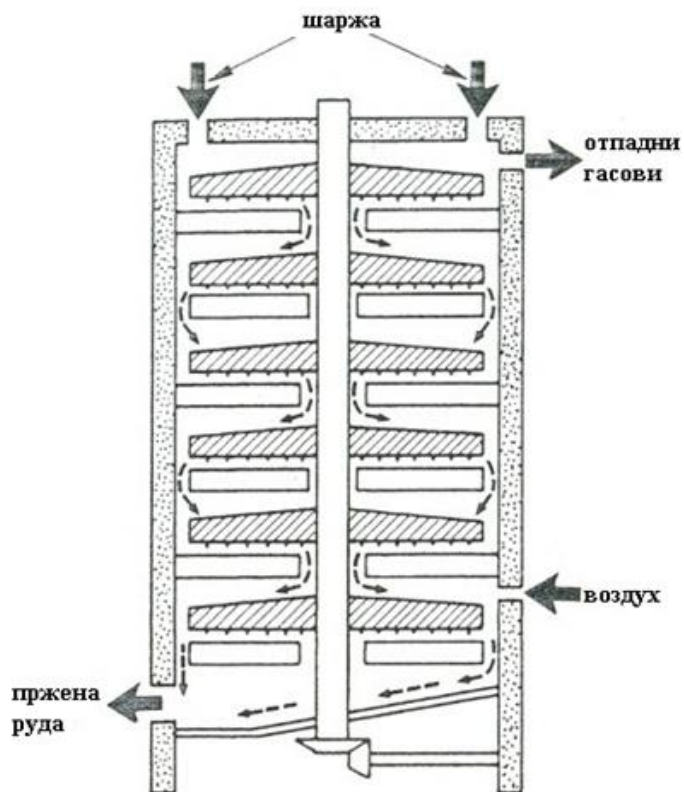
Сулфидните руди често содржат арсениди, антимониди, селениди и телуриди на металот. При оксидационото пржење на оловни, цинкови или бакарни руди, арсенот, селенот и телурот можат да испарат со образување на нивни испарливи оксиди.

Рудата која содржи арсен или антимон сулфид како главен составен дел, со образување испарливи триоксиди As_2O_3 и Sb_2O_3 , може да се пржи со испарување, со што се отстрануваат или значително се намалуваат количините на арсенот и антимонот во рудата.

Во шахтните печки рудата се полни од врвот на печката. Ако како гориво се употребува јаглен или кокс, тие се мешаат со рудата. Јагленот и коксот мора да бидат со што помалку сулфур и пепел. Ако се употребува гас, тој се согорува во посебна комора за согорување и врелите гасови се фрлаат во долниот дел од печката, каде ја загреваат рудата до потребната температура. Воздухот за догорување на јагленот или коксот и за оксидација се доведува низ отвори од страните на саКаменеца печка, а, исто така, и низ самиот прженец на местото од каде овој се извлекува.

Рудата се пржи во печки кои можат да бидат од различен вид.

Пржената руда (прженец) се празни на долниот крај од печката, рачно или механички.

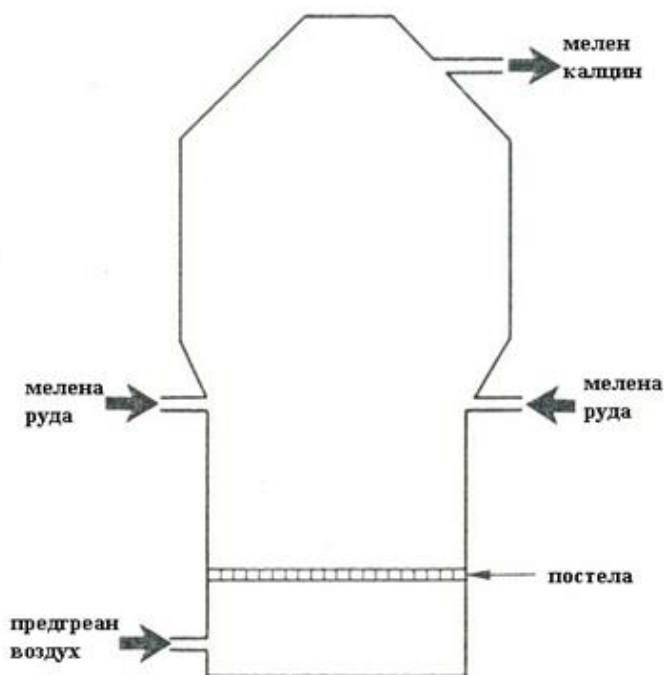


Слика 1.23. Печки за пржење од типот *Wedge*

Гасот од примитивните печки за пржење оди слободно на горниот дел на печката. Кај современите печки гасот се извлекува со помош на ексхаустор, со што се постигнува голема продуктивност на печката.

Кај етажните печки најголем дел од пржењето се изведува додека рудата паѓа од етаж на етаж, сретнувајќи се со струјата на топлиот воздух кој се движи нагоре. Кога ситните честички на

рудата паѓаат низ воздухот, тие ја изложуваат својата целокупна површина на дејството на кислородот и се оксидираат многу побрзо.



Слика 1.24. Печка за пржење во лебдечка состојба

1.4. Металуршка троска

При сите металуршки процеси на топење, освен основниот вреден продукт – металот, втор продукт е течноста троска. Во основата таа се состои од оксиди. Троската и металниот продукт образуваат две фази, кои се разделуваат по тежина, при што троската секогаш ја образува површинската полесна фаза. При топење на суровите руди количината на добиената троска обично е значително поголема од количината на металниот продукт. На пр., при топење оксидни никлени руди со содржина на никел околу 1 %, количината на троската е за повеќе од 10 пати поголема од количината на никлениот каменец. Троската од топењето на рудите ги собира во себе сите компоненти од јаловината и, задолжително, минимална количина од корисниот метал.

Во најголем број проценти на топење на руди троската се јавува како отпаден продукт и не содржи доволно количество корисна компонента, што би ја оправдувало нејзината понатамошна преработка. Но, отпадната троска при неразвиена техника може да стане вредна суровина при развиена техника.

Има процеси во кои троската е основен вреден продукт. Еден од начините за првата преработка на концентратот FeTiO_3 се состои во редукционо топење на концентратот со додаток на антрацит во електротермички печки. При ограничена количина на јаглерод, до метал ќе се редуцира најголема количина од железото, образувајќи метален растоп со: до 2 % јаглерод и околу 0,1 – 0,2 % титан; а тешко редуцирачкиот оксид на титанот образува троска која содржи 80 – 90 % TiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , SiO_2 и само 2 – 5 % Fe. Таа троска оди на хлорирање за да се добие TiCl_4 . Улогата на електротермичкото топење е да се оддели железото и да се добие троска богата со титан. При тоа топење титановата троска е главен продукт, а јаглеродниот челик е спореден продукт.

Троската добиена без топење на руда, на пр., онаа што се добива од рафинација, содржи поголема количина вредни

компоненти. Таквите троски се подложуваат на преработка заедно со рудата.

При некои топења не се добиваат троски. На пр., при редукционото топење на кварцот на метален силициум и при добивањето силикоалуминиум.

Улогата на троската во процесите на топење е очигледно голема. Таа служи како средина во која се завршуваат основните реакции за добивање на корисниот продукт и условува одделување на продуктите од топењето. Количината и особините на троската ја определуваат потрошувачката на топлина при топењето, бидејќи најголем дел од топлината се троши за растопување на троската.

Правилниот избор на троската ги определува резултатите од топењето. Затоа во металургијата поголемо внимание им се обрнува на испитувањата на природата и особините на троската. Се изучуваат врските меѓу составот на троската и нејзините хемиски и термофизички особини: топлотниот капацитет (енталпијата), густината, способноста за растворање на различни тврди фази итн.

1.4.1. Хемиски карактеристики на троската

Оксидите во троската ретко се застапени со помалку од 90 %, а претежно во најголем број троски се содржат во повеќе од 95 %. Освен оксидите, во составот на троската можат да се најдат и сулфиди: CaS (до 5 % во троската од високите печки), ZnS (до 10 % во троска добиена од топење на челик). Во мали количини можат да се најдат и сулфиди на тешките метали: FeS , MnS , Ni_3S_2 , Cu_2S сулфат на бариумот (BaSO_4) и некои халогени соединенија (CaF_2 , NaCl). Како механички примеси троската може да содржи капки од метал, каменец или шпајза.

Оксидите присутни во троската се класифицираат како:

- кисели : SiO_2 , TiO_2 , P_2O_5 , SnO_2 , Ba_2O_3 , As_2O_5 ,
- базни : CaO , MgO , BaO , FeO и др.,
- амфотерни: Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , ZnO .

Киселите оксиди секогаш играат улога на киселина и со базните образуваат соединенија на соли.

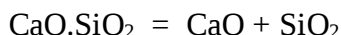
Во базните троски (поголемо количество базни а помало количество кисели компоненти) амфотерните оксиди со јако базните оксиди образуваат алуминати, хромити, ферити, цинкици; на пр., $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, MgO , Fe_2O_3 . Во многу кисели троски, амфотерните оксиди го пополнуваат недостатокот на базните и образуваат соединенија, како, на пр., $\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$.

Во стврднатите троски оксидите во поголем или помал степен се сврзани меѓу себе во соединенија на соли:

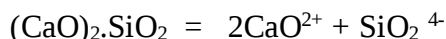
- силикати: $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$,
 $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$.
- титанити: $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$, $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$
- фосфати: $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$, $4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$
- алуминати: $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
- ферити: $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$

Сите тие соединенија лесно се разликуваат под микроскоп во стврдната троска.

Во растопена троска, тие соединенија во значителен степен се дисоцирани на своите компоненти. Дисоцијацијата на хемиските соединенија е возможна по шема на термичка дисоцијација, на пр.,



и електролитичка дисоцијација, на пр.,



Постоењето јони во троската ја покажува нејзината електролитичка спроводливост. Висока електроспроводливост покажуваат базичните троски со мала содржина на SiO_2 .

Најдобра целосна хемиска карактеристика на троската е нејзиниот хемиски состав во тежински или моларни проценти за

сите компоненти кои се содржат во неа. Обично се укажува на содржината во трската на оксидите: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , FeO . Содржината на корисниот метал и на сулфурот и халогените елементи се дава непосредно со нивните компоненти, а не и нивните соединенија. Целосниот хемиски состав на трската, макар што е целосна карактеристика, малку е погоден за срамнување на различни трски. За срамнување се искористува некоја погодна особина на трската, изразена преку една големина – степенот на киселоста.

Степенот на киселоста е односот на вкупниот кислород од киселите оксиди спрема вкупниот кислород од базичните оксиди. Степенот на киселоста кај погонските трски се менува во граници од 0,3 до 3,0. Троска со степен на киселоста 1,0 се вика моносиликатна, со степен на киселоста 2,0 – бисиликатна. Троска со степен на киселоста 1,0 и помал се смета за базна трска, а онаа со степен на киселоста 2,0 и поголем – кисела трска.

Споменатава упростена карактеристика не може да го замени комплетниот хемиски состав на трската, туку се користи само при споредување на трски од еден тип, добиени при преработка на сличен вид суровини.

Постои и друга класификација на трските, која погонски е поприменлива. Таа е изразена преку големината – базицитетот на трската. Тоа е однос на процентите на базните оксиди во трската спрема процентите на киселите оксиди. Овој однос често има различни модификации. Така, на пр., кај хертиевитот базицитетот (B), тој однос е изразен на следниов начин:

$$B = \frac{\% \text{CaO}}{\% \text{SiO}_2}$$

Оваа формула проширена го има следниов облик:

$$Bh = \frac{\% \text{CaO} + \% \text{MgO}}{\% \text{SiO}_2 + \% \text{P}_2\text{O}_5}$$

Според базицитетот, трските ги делиме на:

- Вн < 1 - кисела троска,
- Вм = 1 - неутрална троска (амфотерна),
- Вн > 1 - базична троска.

Реалните индустриски троски претставуваат многукомпонентни системи. Најмногу од троските се составени од две, три, ретко од четири главни компоненти. Другите компоненти се во незначителни количини, што дозволува да ги посКаменецраме како примеси кои не ги променуваат суштинските особини на троската – систем од мал број основни компоненти. Така, троските од рафинација се сметаат за двојни легури на оксидите на рафинираниот метал, SiO_2 и CaO . Троската од конвертувањето на каменецот е легура на оксид на железото и SiO_2 . Троската од бакарни и цинкови шахтни топења е легура на FeO , SiO_2 , и CaO . Троската од топењето во високите печки повеќе од 95 % се состои од SiO_2 , CaO и Al_2O_3 .

1.4.2. Особини на троската

Во металургијата идеалната троска треба да ги има следниве особини:

- а) да не е скапа,
- б) да има ниска температура на образување,
- в) да има ниска температура на топење,
- г) да е течна на работни температури во металургијата,
- д) да има мала специфична тежина,
- ѓ) да раствора што помалку користен метал во себе,
- е) да не содржи поголеми количини испарливи Каменецери.

Цената на троската е од многу големо значење. При производство на некои од благородните или ретките метали троската може да биде поскапа. Но, при производство на сурово железо, челик, бакар, олово, троската мора да биде евтина, бидејќи ја има во прилично голема количина. Затоа овде како

топителите се употребуваат евтини оксиди: вар, варовник, кварц и Fe – оксидите.

Температурата на образување и температурата на топење на трската мора да бидат доволно ниски. Во спротивно, потрошувачката на гориво ќе биде поголема, а во некои случаи на добивање метали со ниска точка на испарување, загубата со испарување на металот ќе биде голема. Треба да се напомене дека трската, како многукомпонентна легура, нема точно одредена точка на топење, туку се топи во температурен интервал.

Во процесите за добивање обоени метали, поголем дел од трските се топи на температура од 1250 °C или пониска. При производството на сурово железо и челик, температурата на трска е 1300 – 1600 °C. Всушност, особината на трската – температура на слободно течење на трска, е најважен показател за практичната работа. Таа температура е обично за 100 – 200 °C повисока од температурата на топењето.

Флуидноста на трската е функција која го условува капацитетот на печката и ефектот на собирањето на нечистотиите во неа. Доколку е трската пофлуидна, минувајќи надолу низ меѓупросторите на шаржата полесно реагира и полесно апсорбира одредени нечистотии. Пофлуидната трска полесно се испушта низ отворот на печката отколку погустата. Освен тоа, при тенок слој и со брзо минување преку честичките на рудата има значително поголем ефект во собирањето на нечистотиите. Исто така, загубата на метал во вид на механички приклучоци во трската ќе биде помала ако е таа флуидна.

Специфичната тежина на трската игра слична улога. Трската со голема специфична тежина, а тоа значи и со помала разлика во специфичните тежини меѓу неа и металот, доведува до поголеми загуби. Затоа во пракса секогаш се бара трската да има специфична тежина помала најмалку за 1,0 од онаа на металот.

1.4.3. Процес на образување трска при топење

Продуктите од топењето не се наоѓаат во тврдата шаржа во готов вид; тие се образуваат при топењето од компонентите на

шаржата. Едно од важните прашања во теоријата на топењето е прашањето за температурата на образување на трската. Во пракса температурата на образување на трска од компонентите на шаржата е повисока од температурата на готовата трска. Ако во шаржата се внесе не многу голема количина готова трска, температурата на образување на трската од компонентите на шаржата суштински се намалува. Тоа се користи во праксата.

Механизмот на образување трска од парчињата на шаржата се одвива во два стадиума.

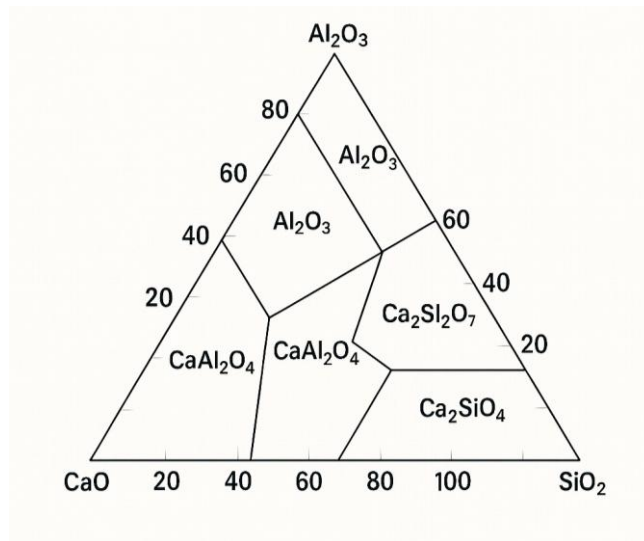
1. При постепено загревање на шаржата се појавува течна фаза или по пат на растопување на најлесно топливите парчиња на шаржата или по пат на образување на лесно топливи компоненти при заемното дејство на две допирни разнородни парчиња од шаржата.

2. Потоа протечува процесот на растворање на парчињата од шаржата во веќе образуваната течна фаза.

На температурата на образување на трската влијае и степенот на иситнетоста на компонентите на шаржата и степенот на нивното помешување. Колку се поситни и подобро измешани компонентите на шаржата, полесно ќе поминуваат во течна трска, а со тоа ќе биде пониска температурата на образување на трската. Воопшто, трската секогаш се добива со некој степен на прегреаност во однос на температурата на топење.

Големината на тоа прегревање зависи од физичкиот карактер на шаржата: крупноста на парчињата и степенот на помешаноста.

Образувањето на трската од компонентите на шаржата протечува со добивање хемиски соединенија и со ослободување топлина. Вкупната топлина ослободена при образувањето на трската се вика топлотен ефект на образувањето на трската. Топлината на образувањето на трската не е голема вредност, претставува неколку проценти од општиот период на топлина при изведување на топењето.

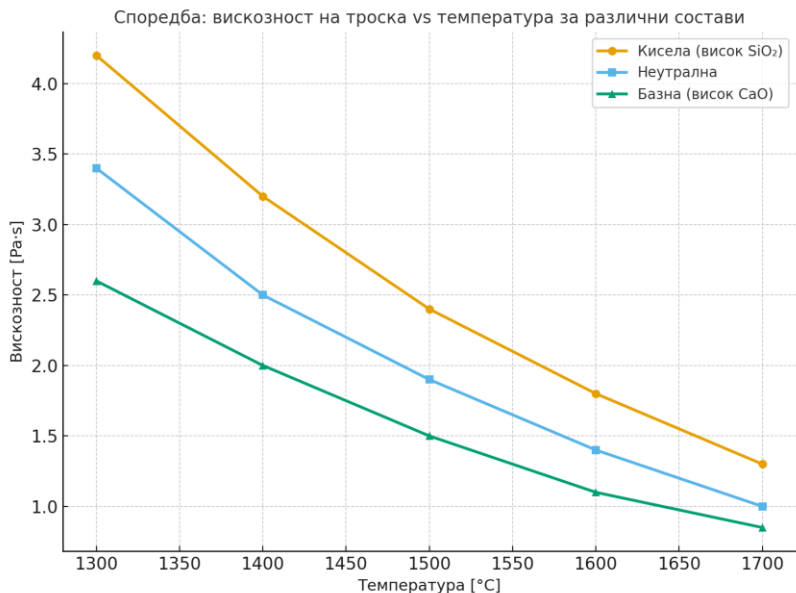


Слика 1.25. Рамнотежен дијаграм на трокомпонентен систем

CaO - SiO₂ - Al₂O₃

Ако шаржата претходно се подготви со пирометалуршка преработка (агломерација или пржење), тогаш дел од реакциите за образување на троската се одвиваат при тие процеси.

При топење одредена суровина металургот го избира составот на троската за топење, тргнувајќи од составот на суровините и од карактерот на спроведуваниот процес. При изборот на троската се користат температурата на топењето и вискозноста на троската, зависноста на густината од составот и големината на загубите на метал во троската. Самотопливите суровини имаат таков состав што при топењето се добиваат бараните за дадените процеси троски, без додавање топители.



Слика 1.26. Дијаграм на вискозноста на троската

Во најголем број случаи, за добивање добра троска се додаваат топители во шаржата. Ако во суровината преовладуваат кисели компоненти (SiO_2 и Al_2O_3), тогаш се додаваат базни топители. Ако е суровината богата со базни, тогаш се додаваат кисели топители.

1.4. 4. Искористување на троската

Повратната троска се излива во специјални калапи или во тенок слој кој лесно се раскршува. Се користи во металуршките процеси како компонента на шаржата.

Отпадната троска или се гранулира во струја на вода и се изнесува во вид на песок или се одведува во отпад во растопена состојба – во специјални казани за троска. Гранулираната троска се користи за градење патишта, за посипување на работниот простор во рудниците итн. Некои троски од високите печки можат да се искористат за производство на градежен Материјал: пресувани троскини цигли, бетон итн. Троските од обоената металургија кои се цврсти, каменовидни, можат да се применуваат за изливање на камења.

Некои од процесите за добивање челик, кои преработуваат сурово железо со голем процент на фосфор (1,5 – 2,0), како што се Томасовиот и LD-AC процесот, даваат троска со голем процент на P_2O_5 (> 14 %), кој е лесно растворлив во лимонска киселина. Таа троска се користи за вештачко ѓубриво познато под името Томасово брашно.

Некои од металуршките троски наоѓаат примена во производството на стакло.

1.5. Топители

Топители се одредени суровини во металургијата, кои се додаваат во засипот за да ги сврзат јаловите компоненти од рудата и горивото во троска, со што ги извршуваат следните задачи:

1. образуваат троска со базен состав,
2. ја снижуваат температурата на топењето и специфичната тежина на троската,
3. сврзуваат одредени штетни примеси во металот и ги изнесуваат преку троската.

При топење одредена суровина металургот го избира составот на троската, тргнувајќи од составот на суровината и топители и карактерот на спроведуваниот процес. За да се добие добра троска во шаржата најчесто се додаваат топители. Постојат и таканаречени самотопливи руди, кои имаат таков состав што при нивното топење се добива бараната троска без додавање топители. Ако во суровината (рудата) преовладуваат кисели компоненти SiO_2 и Al_2O_3 , тогаш се додаваат базни топители; ако суровината е богата со базни компоненти, тогаш се додаваат кисели топители. Како базни топители служат: варовник CaCO_3 , доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ и железни руди (за топење на обоени метали) Fe_2O_3 , FeCO_3 . Како квалитетен кисел топител се употребува исклучително SiO_2 во форма на кварц. Многу ретко, за специјални цели, се користат и такви топители, како што се: гипс $\text{Ca}_3\text{O}_42\text{H}_2\text{O}$, флуорит CaF_2 , сулфат на натриумот K_2SO_4 , сода Na_2CO_3 .

Најчесто при топењето се применува еден, ретко два различни топители. Има случаи на едновремена примена на три различни топители, на пр., при топење цинков концентрат, во шаржата се додаваат кварц, варовник и железна руда, со што се добива лесно топлива троска која содржи не повеќе од 20 % ZnO . Ако при топењето се добива мала количина на троска, која не овозможува нормално течење на металуршкиот процес, тогаш масата на троската се зголемува со додавање на готова троска од такво топење во шаржата.

Каде што е можно треба да се избегнува додавањето на чисти јалови топители, како што се: вар, варовник и др. Доколку може треба да се употреби топител кој носи во себе извесна количина од корисниот метал.

1.5.1. Варовник и вар

Тоа се најчесто употребуваните топители, како во црната така и во обоената металургија. Во процесите што се одвиваат во затворени шахтни печки, како топител најчесто се употребува варовникот (CaCO_3), додека во отворени огнишни печки се употребува печената вар (CaO). Но, и самиот варовник во печката во зоната на високи температури се распаѓа на CaO и CO_2 и како CaO влегува во составот на троската. Во најголем дел бакарните и оловните руди се кисели, исто така, и најголем дел од железните руди, и мораат да се топат со некој базичен топител. Калциум оксидот ја смалува специфичната тежина и до извесна содржина ја смалува температурата на топење на троската. Варовникот, меѓутоа, при топењето на обоените метали речиси никогаш не се употребува сам, туку секогаш со повеќе или помалку оксиди на железото кои настојуваат да го подобрат вискозитетот и точката на топење на троската. Треба да се напомене дека варовникот е поевтин од оксидот на железото и за одредена тежина неутрализира повеќе SiO_2 , што значи дека произведува помалку троска.

Доломитот $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ или MgCO_3 во извесни случаи има примена со цел да се внесе во троската MgO , кој во одреден процент ја прави пофлуидна, а преку одредена граница и повискозна.

Варот (CaO) како топител има широка примена во процесите за производство на челик. Сите базни процеси за производство на челик се базираат на примената на вар како топител. Варот применет за производство на челик треба да ги има следниве особини:

1.5.2. Железни оксиди

Во процесите за добивање обоени метали железната руда има примена како топител. Не е секогаш потребно да биде богата со железни оксиди и затоа, најчесто, се користи сиромашна железна руда. Честопати овие железни руди носат и мали количини на драгоцен метали, кои при процесите за добивање бакар, олово и други обоени метали се искористуваат.

Троската со поголема содржина на FeO е многу агресивна врз облогата на печката и секогаш треба да се внимава кога се работи со неа.

Во процесот на производство на челик, железната руда се употребува само ако е богата со минимум 50 % Fe и не служи како топител, туку како носител на кислород. Се додава за забрзување на процесот на оксидација на придружните елементи во суровото железо.

1.5.3. Силициум диоксид

Тој е еден од најупотребуваните и најевтините топители. Се употребува во вид на песок, кварцит или кварц. Често, наместо чист SiO_2 се употребуваат и силикатни руди кои носат помали количини на злато и сребро. Меѓутоа, многу од тие силикатни руди содржат силикати, како што се: фелтспат, хорнбленда и лискун, кои се товар при топењето на рудата, бидејќи за да се истопат во печката за нив треба да се доведе топлина.

Во металургијата се употребуваат и други топители, кои се поскапи и поретко се употребуваат. Тие можат да се поделат на три основни групи:

1. Оксидациони топители, како што се натриумот и калиум нитратот, оксидите на оловото и манганот. Тие заедно со воздухот се извор на кислород во процесот. Тие се скапи и нивната употреба е ограничена на преработка на рудите на злато и сребро.

2. Редукциони топители од кои најпознати се цијанидите. Тие се скапи и се употребуваат само при специјални процеси.
3. Неутрални топители. Во нив се вбројува CaF_2 , треба да има мин. 85 % CaF_2 , 5 % SiO_2 и најмногу 0,65 % S.
4. Како неутрален топител се смета и Na_2SO_4 , кој се употребува за растворање на налепите во печките за топење на олово и бакар.

1.6. Прашања и одговори

1. Што проучува металургијата како стопанска и инженерска гранка?

Одговор: Металургијата се занимава со добивање на метали од суровини, нивна преработка во полуфабрикати и готови производи, како и со развој и оптимизација на технолошки процеси за нивно индустриско производство.

2. Кои се основните делови на металургијата?

Одговор: Металургијата се дели на екстрактивна металургија (добивање метали од руди) и преработувачка металургија (производство на полуфабрикати и готови производи).

3. Што претставува јаловината?

Одговор: Јаловината е делот од рудата кој не го содржи корисниот минерал и претставува отпаден Материјал при металуршката преработка.

4. Кои се трите основни групи на металуршки процеси?

Одговор: Пирометалуршки, хидрометалуршки и електрометалуршки процеси.

5. Која е главната карактеристика на пирометалуршките процеси?

Одговор: Тие се одвиваат при повишени температури и овозможуваат физичко-хемиски претворби како оксидација, редукција и топење.

6. На кои процеси се делат пирометалуршките постапки?

Одговор: На процеси на жарење, топење и дестилација (сублимација).

7. Што претставува процесот на топење?

Одговор: Технолошка операција во која целата шаржа се топи и се добиваат две немешливи течни фази: метал и троска.

8. Што е троска и која е нејзината улога?

Одговор: Троската е растоп од оксиди кој ги собира јаловинските компоненти и несаканите примеси, овозможува одделување на металот и учествува во реакциите на топење.

9. Што се топители и зошто се додаваат во шаржата?

Одговор: Топителите се Материјали кои се додаваат за да се добие троска со поволен состав, пониска температура на топење и добра флуидност.

10. Што претставува каменецот?

Одговор: Каменецот е растоп на сулфиди (FeS , Cu_2S , NiS и др.) и претставува меѓупродукт при добивање на обоени метали.

11. За кои метали се применува дестилација или сублимација?

Одговор: За метали со ниска температура на вриење, како жива и цинк.

12. Кога се применува хидрометалуршката постапка?

Одговор: Кај сиромашни руди каде пирометалургијата е неекономична или технолошки непогодна.

13. Што е процес на лужење?

Одговор: Селективно растварање на металот од рудата во воден раствор со цел негово понатамошно издвојување.

14. Кои се главните предности на хидрометалургијата?

Одговор: Можност за обработка на многу сиромашни руди, селективност и помало енергетско оптоварување.

15. Кои се главните недостатоци на хидрометалуршката постапка?

Одговор: Потреба од големи агрегати, големи количини раствори и подолг процес.

16. На кои групи се делат електрометалуршките процеси?

Одговор: На електротермички и електрохемиски процеси.

17. Во што се состои електрохемиската металургија?

Одговор: Во издвојување на металите преку електролиза на водени раствори или растопени соли.

18. Што претставува дробењето на рудата?

Одговор: Прва технолошка операција при која рудата се уситнува за да се зголеми специфичната површина и да се ослободи корисниот минерал.

19. Која е улогата на мелењето?

Одговор: Понатамошно ситнење на рудата со цел подобра концентрација и подготовка за обогатување.

20. Што претставува сеењето (класификацијата)?

Одговор: Операција при која Материјалот се дели на класи според големината на зрната.

21. Што е гранулометриска анализа?

Одговор: Постапка за одредување на распределбата на зрната по големина во сомелениот Материјал.

22. Што претставува обогатувањето на рудата?

Одговор: Концентрација на корисните минерали со одделување од јаловината.

23. Кои се фазите на обезводнување?

Одговор: Згуснување, филтрација и сушење.

24. Што е металуршка подготовка (укрупнување)?

Одговор: Процес на оформување ситнозрнест Материјал во поголеми тела (агломерат, пелети, брикети) погодни за печки.

25. Зошто се врши агломерација и пелетизација?

Одговор: За подобрување на гасната пропустливост, рамномерноста на засипот и зголемување на производноста на печките.

Поглавје 2 Гориво и редуценти

2. Улога и значење на горивата во металургијата

Горивото претставува еден од најважните потрошни и енергетски ресурси во металуршката индустрија. Неговата основна функција е обезбедување на потребната топлотна енергија за одвивање на различните физичко-хемиски процеси кои се карактеристични за екстрактивната и преработувачката металургија, како што се: сушење, пржење, топење, редукција и рафинирање на металите. Без соодветен извор на енергија, овие процеси не би можеле да се реализираат во индустриски услови.

Во природата, горивата се јавуваат во различни агрегатни состојби и хемиски облици – како цврсти, течни и гасовити горива, при што секоја група има специфични физички, хемиски и енергетски карактеристики. Изборот на соодветно гориво, како и начинот на неговата примена, директно зависи од природата на технолошкиот процес, работната температура, потребниот топлински топител, како и од конструктивните карактеристики на металуршката печка или постројка. На пример,

високоенергетските процеси во електролачни и високи печки бараат горива со висока топлотна моќ и стабилни карактеристики при екстремни температури.

За едно гориво да биде технички и економски прифатливо за примена во металургијата, неопходно е да исполнува повеќе основни услови:

1. **Чистота на горивото** – Горивото треба да биде доволно чисто, односно да содржи минимално количество несогорливи Каменецирии (пепел, минерални примеси), бидејќи тие ја намалуваат неговата ефективна топлотна моќ и можат да предизвикаат дополнително формирање на троска или талози во печките.
2. **Достапност и резерви** – Горивото или суровината од која тоа се добива мора да се наоѓа во природата во доволни количини. Резервите треба да бидат големи, сигурни и лесно достапни, со цел експлоатацијата и транспортот да бидат економски оправдани на долг рок.
3. **Безбедност на продуктите од согорување** – Гасовитите продукти кои се создаваат при согорувањето на горивото треба, во што е можно поголема мера, да бидат безопасни за здравјето на луѓето и за индустриските постројки. Ова е особено важно од аспект на заштитата на работната средина и исполнувањето на современите еколошки стандарди.
4. **Стабилност при складирање** – За време на складирањето, горивото треба да ги задржи своите физички и хемиски својства или да не претрпи значителни промени. Особено е важно горивото да не подлежи на самозапалување, оксидација или деградација, што би можело да доведе до безбедносни ризици и економски загуби.
5. **Механичка цврстина и погодност за транспорт** – Горивото мора да поседува соодветна механичка цврстина или да биде во таков облик што ќе овозможи негово безбедно и економично транспортирање на големи

растојанија, без значително дробење, губење на маса или квалитет.

6. **Економска оправданост** – Цената на горивото и трошоците поврзани со неговата подготовка, транспорт и употреба мора да бидат такви што неговата примена во металуршкиот процес ќе биде економски исплатлива и конкурентна во однос на алтернативните енергетски извори.

Во современата металургија, покрај класичните горива, сè поголемо значење добиваат и енергетски ефикасните и еколошки прифатливи решенија, како што се: употребата на гасовити горива, секундарни енергетски извори и интеграцијата на обновливи извори на енергија. Овие трендови претставуваат основа за развој на одржлива и „зелена“ металургија, која е насочена кон намалување на емисиите и зголемување на енергетската ефикасност на металуршките процеси.

2.1. Хемиски состав на горивото

Во составот на горивата кои се искористуваат во металургијата има елементи карактеристични за органските соединенија (C, H, O, N, S). Освен тоа, во горивото се содржат минерални примеси, како: SiO_2 , Al_2O_3 , SaO , MgO , Na_2O , K_2O , Fe_2O_3 и др., кои заеднички се наречени пепел на горивото (A), а, исто така, тоа содржи и влага (W).

Ј а г л е р о д о т е најважна компонента на горивото. При неговото горење се ослободува значајна количина топлина.

В о д о р о д о т е важна компонента во составот на горивото. Топлината при согорувањето е приближно 3,5 пати поголема од онаа на јаглеродот.

Водородот во горивото се наоѓа во вид на соединенија со јаглеродот, сулфурот и кислородот и во слободна состојба.

А з о т о т што се наоѓа во горивото е баласт, бидејќи во услови на обичен процес во печката не учествува во горењето и преминува непроменет во продуктите од согорувањето. Во тврдото и течното гориво има мала количина азот (не повеќе од 2,0 – 2,5 %).

К и с л о р о д о т е несакан составен дел на горивото. Тој, исто така, претставува баласт на органскиот дел од горивото.

С у л ф у р о т што се наоѓа во горивото може да биде како S, сврзан со другите елементи на горивото, сврзан со железото како FeS_2 (пирит), сулфатен сулфур, сврзан со сулфат како CaSO_4 , FeSO_4 итн.

В л а г а т а е исклучително непожелен составен дел на горивото. Колку има повеќе влага, толку е помал квалитетот на горивото.

П е п е л о т, исто така, претставува тврда непожелна компонента на горивото, која како минерална примеса ја намалува количината на согорливите компоненти на горивото.

Испарливи се нарекуваат гасообразните и парообразните Каменецирии, кои се одделуваат од горивото при неговото загревање без присуство на воздух.

2.2. Хемиска анализа на горивото

- ❖ За составот и квалитетот на горивото се суди по неговата анализа. Разликуваме техничка и целосна (елементарна) анализа на горивото.
- ❖ Техничката анализа може да се направи во секоја фабричка лабораторија и показателите се доволни за сигурна секојдневна контрола на квалитетот на горивото.
- ❖ Со техничката анализа на тврдо и течно гориво обично се определува процентната содржина на влагата (W), пепелот (A) и испарливите Каменецирии (I). Освен тоа, во некои случаи дополнително се определува содржината на сулфурот, карактерот на коксовиот (неиспарлив) остаток и калоричноста на горивото.
- ❖ При целосната анализа на горивото, напоредно со показателите на техничката анализа, се определува и елементарниот состав на горливата маса на тврдото и течното гориво (C, H, O, N и S).

2.3. Класификација на горивата

Општо, горивата ги делиме:

1. според нивната агрегатна состојба на: цврсти, течни и гасовити;
2. според начинот на нивното настанување на: природни и вештачки; и
3. според нивната постојаност на топлина на: топлопостојани и топлонепостојани.

Под природни горива ги подразбираме горивата од растително и животинско потекло, кои се создадени со природни процеси и под влијание на природни сили, а се користат посебно без преработка.

Вештачките горива се добиваат од природните горива или други Каменеџерији по пат на посебна преработка, при што се менува видот, а понекаде и составот на првобитната Каменеџерија.

Кај вештачките горива особено е важен процесот на добивање, кој може да биде различен:

а) облагородување, како најпрост начин кој ги опфаќа: сушењето, чистењето, пресувањето, мелењето, давањето одреден облик.

б) сува дестилација, која како производ дава такво гориво кое во природни услови не може да се создаде само од себе. На овој начин се добива гориво составено од скоро чист јаглерод-кокс, дрвен јаглен. Како споредни продукти се добиваат гасовити Каменеџерији, тер и др.;

в) гасификација, при која се врши целосно претворање на цврсто гориво во гасовито (генераторски гас и сл.);

г) дестилација, при која од течни горива се добиваат нови видови горива (дестилација на нафта, екстракт од камен јаглен, тер од разни видови јаглен и др.);

д) специјални процеси, претворање на еден вид гориво во друг, со сложени операции и скапи постројки.

За да можеме горивата да ги разликуваме и според нивното однесување при загревање, ги делиме на: постојани на топлина и непостојани на топлина.

Топлопостојани горива се оние чија горлива Каменеџерија е составена само од С и Н₂ – јаглеводороди. Овие горива можат да бидат цврсти, течни и гасовити.

Нивна одлика е да можат со постепено загревање да преминуваат од една во друга агрегатна состојба, не менувајќи го својот хемиски состав (парафин, нафта, бензин и др.). Дури на високи температури настанува распаѓање на јаглеводородите од овие горива, кои обвиеени со атмосферски воздух согоруваат во: CO₂ CO и H₂O.

Топлонепостојаните горива имаат горивна Каменецерија во чиј состав, покрај С и Н₂, има и О₂; при загревање тие не ја менуваат агрегатната состојба, но постепено се претвораат во кокс, менувајќи го притоа и својот хемиски состав.

2.4. Топлотна моќ на горивото

- Топлотна моќ на горивото значи количина на топлина добиена со согорување на единица тежина или единица волумен на горивото. Така дефинирана топлотна моќ е израз на количината на енергија што ја содржи горивото.
- Топлотната моќ се изразува со цули по единица тежина или единица волумен на горивото (kJ/kg , J/gr , kJ/m^3).
- Големината на топлотната моќ на одделни видови од едно исто гориво е различна. Така, на пр., топлотната моќ на најкалоричните тврди горива (слаб камен јаглен и антрацит) е $35600 - 3600 \text{ kJ/kg}$, а на суровите јаглени од ист вид, значи со пепел и влага, $33500 - 34000 \text{ kJ/kg}$.
- Течните горива, поради голеКаменеца количина на H_2 во нивниот состав, кој има топлотна моќ 145000 kJ , имаат поголема моќ, во зависност од тоа дали во составот преовладуваат CH_4 , CO , H_2 или др.

Одредување на топлотната моќ – КаменецаКаменецички и експериментално:

- a. сметање од податоците на елементарната и техничката анализа на горивото,
- b. согорување на проба од горивото во калориметарски сад.

На топлотната моќ на горивото особено влијаат влагата и пепелот. Зголемувањето на содржината на влагата во горивото за 1 % ја намалува неговата топлотна моќ за 1 % (грубо речено). Поголемиот процент на пепел и влага го намалува процентот на согорливата Каменецацерија.

2.5. Цврсти горива

Цврстите горива ги делиме на две главни групи: природни и вештачки.

- Под цврсти горива ги подразбираме сите производи на растителниот свет кои можат да се употребат за гориво: **дрво, разни грмушки, слама, трева и др.** Тука спаѓаат и разни „фосилни“ и „минерални“ горива, т.е. јаглени од сите видови.
- Фосилните горива настанале со процес на јагленисување на дрвото, преку различни степени (стадиуми) – **тресет, мрк јаглен, млад камен јаглен, масен камен јаглен, слаб камен, јаглен, антрацит и графит**, кој е чист јаглерод.

Табела 2.1. Чиста Каменецирија на цврсти горива

Вид гориво	Состав на чистата Каменецирија во					Волатили %
	%					
	C	H	O	N	S	
дрво	50	6	43	1	-	75
тресет	57	5	36	1,6	0,4	65
мрк јаглен	69,5	5,6	22,7	1,0	1,2	55
гасен јаглен	87,0	5,5	8,0	1,5	1,0	35
масен јаглен	88,0	5,0	4,5	1,5	1,0	25
посен јаглен	90,0	4,5	3,0	1,5	1,0	15
антрацит	91,5	3,8	2,2	1,5	1,0	10
кокс	96,5	0,7	0,6	1,0	1,0	-

Табела 2.2. Состав на цврстите горива (просечно)

Гориво	<u>Хемиски состав %</u>					Пепел %	Влага %	Топл.моќ кЈ/kg	Испар ливо %
	C	H	O	N	S				
Дрво (тврдо, суво)	40	5	33	0,5	-	1,5	20	3000	-
Тресет (сув)	40	4	20	1,0	-	10	25	2800	-
лигнит	35	3	16	0,5 до 1,0		5-12	30-50	1800 3000	70
мрк јаглен	50 0,3	4	14	0,6	0,5-	5-12	10-30	4000	50

камен јаглен масен	70	5	9	1,0	1,0	7	3	7000	25
камен јаглен посен	80	4	4	1	1	7	1-4	7500	15
антрацит	84	2	2	1	0,7	7	3	7800	5
кокс металуршки	87	0,6	-	1,5	1	9-11	3	7100	-

Доколку горивото е геолошки постаро, произразити се следниве особини: специфичната тежина (компактност), тврдост, црната боја и минералниот сјај. Со геолошката старост расте и содржината на јаглеродот, големината на коксниот остаток и топлотната моќ, додека содржината на O_2 и H_2 се намалува.

Колку е геолошката старост на еден вид гориво поголема, толку е помала содржината на влага а поголема содржината на пепел.

2.5.1. Д р в о

Некогаш дрвото во металургијата се користело директно или преку дрвен јаглен. Денес дрвото има сосема ограничена примена во металургијата. Тоа служи, главно, за сушење и предгревање на печките.

Топлотната моќ во значителна мера зависи од влагата и кај дрвото сушено на воздух е 13400 – 16300 кJ/kg.

2.5.2. Т р е с е т

Тресетот како гориво спаѓа во секундарните природни цврсти горива. Настанува во мочуришни области, каде настанува јагленисување на растенијата под вода при поволни климатски услови.

Во сурова состојба тресетот содржи 80 – 90 % влага. Со воздушно сушење влагата може да се намали на 25 – 35 %. Вештачките начини на сушење немаат практична примена поради неекономичноста. Составот на сувиот тресет е:

40 % C, 4 % H_2 , 20 % O_2 , 1 % N_2 , 10 % пепел и 25 % влага.

Содржината на S во горните слоеви не поминува 1,0 %, а во долните изнесува околу 1,5 %. Содржината на испарливите Каменеџерии е многу голема и изнесува 70 – 75 % сметано на основната горивна маса.

Пепелот може да биде кисел: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 - 90 \%$, а може да има и: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 - 30 \%$, и $\text{CaO} + \text{MgO} - 30 \%$.

Калоричната моќ му е 18400 – 25000 к.Ј/kg.

2.5.3. Цврсти минерални горива

Под заедничко име цврсти минерални горива ги нарекуваме: лигнитот, мркиот јаглен, антрацитот и графитот, иако графитот никогаш не служи како гориво.

Во текот на преминувањето од дрво во антрацит се зголемува содржината на C, а се смалува содржината на H_2 и O_2 .

Општи физички особини на минералните горива се:

а) Специфична тежина. Специфичната тежина на чистиот јаглен е дотолку помала, доколку е помала содржината на јаглородот. Таа расте со геолошката старост. Кај мрките јаглени е во границите 0,8 – 1,5, а кај камениот јаглен меѓу 1,16 – 1,60.

б) Трага. Трагата што јагленот ја остава на бела рапава површина е по боја светломерка до црна. Поцрна е доколку јагленот содржи повеќе јаглород, односно доколку е геолошки постар.

в) Боја. Во принцип геолошки постарите јаглени имаат и потемна боја. Црната боја на камените јаглени има повеќе нијанси: сивоцрна до црвеникавоцрна, кај антрацитот; сивоцрна до мркоцрна кај јаглените без сјај.

г) Сјај. Јаглените се многу различни по сјајност. Сјајните камени јаглени имаат честопати длабоко црн сјај. Антрацитот е метално сјаен. Лигнитот има сивоцрна сомотска боја. Мрките јаглени немаат сјај; дури под дејство на топлина и притисок стануваат сјајни.

д) *Топлоспроводливост.* Камените јаглени се лоши спроводници на топлина. Нивната топлоспроводливост е многу мала. Покомпактните јаглени имаат помала специфична топлина.

2.5.3.1. Л и г н и т

Лигнитот е млад јаглен, настанат со јагленисување на тресетот. По боја е мрк, а структурата му е слична на онаа на дрвото. Содржи многу пепел и влага, а калоричната вредност му е мала.

Најголема примена во металургијата има како јаглен за гасификација во гас генераторите.

Неговиот состав отприлика е следниов: 35 % C, 3,0 % H₂, 16 % O₂, 0,5 % N₂, 1,0 % S, 5 – 12 % пепел, 30 – 40 % влага.

Испарливите состојки се во голем процент, околу 70 %.

Калоричната моќ му е: 8400 – 12600 к.Ј/kg.

Експлоатацијата се врши со дневен коп и јамски работи. Дневниот коп е многу порентабилен.

Табела 2.3. Состав и топлотна моќ на лигнити

Рудник	Влага %	Пепел %	Согорливи %	Топлотна моќ kJ/kg
Крека	37	11	53	8400
Костолац	44	13	43	9600
Косово	15	45	42	9600
Колубара	50	10	37	8800
Плевле	28	10	60	14600

2.5.3.2. М р к ј а г л е н

Мркиот јаглен е нешто постар од лигнитот. Се јавува често во слоеви од 15 m, а ретко и до 100 m дебелина. Се вика мрк, бидејќи при гребнатица остава мрка трага.

Хемискиот состав на мркиот јаглен отприлика е следниов, : 50,0 % C, 4,0 % H₂, 14,0 % O₂, 0,6 % N₂, 0,5 – 3,0 % S, 5 – 15 % пепел, 20 – 30 % влага.

Калоричната моќ му е 16800 kJ/kg. Се пали на 250 – 400 °C.

Мркиот јаглен се класифицира со сува или мокра сепарација како:

парче (до 60 mm), коцка (60 – 30 mm), орев (30 – 15 mm), грашок (15 – 5 mm), и прашина (5 mm).

- Преработка на мркиот јаглен.

Мркиот јаглен се подложува на сува дестилација на ниска температура (500 °C), заради искористување на битуменот. При овој процес, како споредни производи се добиваат: швелен кокс (до 25 %) и швелен гас (300 m³/100 kg). Во швелниот гас се наоѓа катран (до 25 %).

Катранот, по пат на фракциона дестилација, се преработува во бензин, гасно масло, лесно и тешко моторно масло, масло за ложење и асфалт. На овој начин од катранот се добиваат дестилатите на нафтата.

Табела 2.4. Состав и топлотна моќ на мрк јаглен

Рудник	Влага %	Пепел %	Согорливи %	Топлотна моќ kJ/kg
Бановиќи	20	20	60	16000
Какањ и Бреза	15	25	60	17200
Алексинац	10	25	65	16700
Сењско-рес.	17	17	65	18400
Велење	42	10	48	10800
Трбовле	23	14	60	16000

Швелниот кокс е одлично средство за ложење во домаќинствата, бидејќи калоричната моќ му е 5000 – 6000 kcal/kg. Мркиот јаглен, поради зголемувањето на неговата топлотна моќ, се брикетира. Брикетите можат да бидат со најразличен облик. Калоричната моќ на брикетите изнесува 4500 – 5500 kcal/kg.

2.5.3.3. Камен јаглен

Камениот јаглен настанал во постарите геолошки формации. Се јавува во слоеви кои можат да имаат и 50 м дебелина. Кога ќе се гребне остава црна трага. По боја е црн, а површината му е темна или сјајна. Содржината на битумен во него е различна. Камениот јаглен со многу испарливи состојки се вика масен, а со мала количина на волатили се вика посен. Масниот камен јаглен согорува со долг пламен. Се употребува за производство на кокс. Има следен состав: 77,0 % C; 5,0 % H; 9,0 % O; 1,0 % K; 1,0 % S; 7,0 % пепел, 3,0 % влага, 35,0 % испарливи Каменецирии.

Калоричната моќ му е 7000 kcal/kg.

Посниот камен јаглен гори со краток пламен, бидејќи има помалку волатили. Неговиот хемиски состав отприлика е: 80,0 % C, 4,0 % H, 4,0 % O, 1,0 % K, 1,0 % S, 7,0 % пепел, 1 – 4,0 % влага, 25 % испарливи Каменецирии.

Калоричната моќ му е 29000 kJ/kg.

Камениот јаглен, всушност, е цврсто гориво, најважно во металургијата. Претежно се користи како суровина за добивање кокс. Важноста на коксот ја наметнува потребата од класифицирање на камениот јаглен во класи погодни, или не, за коксирање. Особините кои го карактеризираат јагленот за коксирање не се ни содржината на волатили, ниту, пак, пепелот. Условот за коксирање е, всушност, количината на битумен (топлива смолеста Каменецирија).

Извесни видови јаглен се склони кон самозапалување и е неопходно да се води сметка за складирањето – најмногу 1 – 6 месеци, а висината на слојот не треба да биде поголема од 1,5 m.

2.5.3.4. Антрацит

Антрацитот е најстар јаглен и со најголема калорична моќ. Содржи мала количина на пепел и влага, а особено малку испарливи Каменецирии. Неговата површина е многу сјајна. Хемискиот состав му е отприлика следниов: 84,0 % C, 2,0 % H, 2,0 % O, 1,0 % K, 0,7 % S, 7,0 % пепел, 3,0 % влага, 5,0 % испарливи Каменецирии.

Има голема цврстина и тврдост. Гори со краток пламен и бавно, бидејќи содржи малку испарливи Каменецирии. Има голема топлотна моќ – 32600 kJ/kg.

Антрацитот се употребува директно во металуршките процеси. Не е погоден за коксирање.

2.6. Вештачки цврсти горива

Овие горива најголема примена наоѓаат во високите печки и во други шахтни печки. Затоа тие треба да ги исполнуваат следниве основни барања:

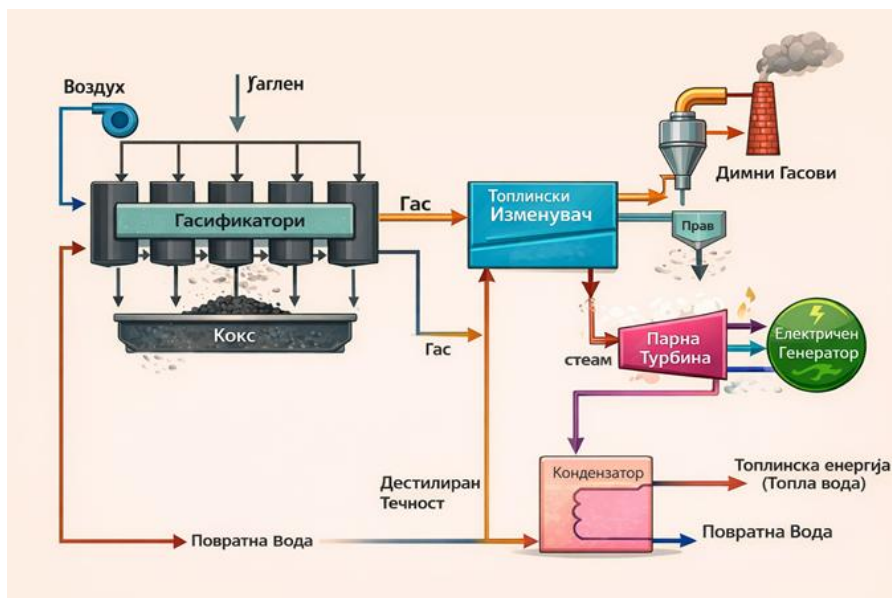
- а) по можност, да имаат поголема топлотна моќ,
- б) штетните примеси – S и P, да бидат во минимална количина,
- в) да содржат што помалку пепел,
- г) да се порозни, за подобра пропустливост на гасовите,
- д) да бидат здрави, да имаат одредена цврстина за да можат да го издржат притисокот на засипниот Материјал,
- ѓ) да се отпорни на абеење, за да не се дробат при засипувањето и слегнувањето на засипниот Материјал во печката.

2.6.1. Кокс

Најголема употреба металуршкиот кокс има во високите печки. Тој на полно одговара на сите барања кои се поставуваат

при неговата примена. Првите опити со примена на овој кокс се правени уште во 18 век, но до средината на 19 век повеќе од половината сурово железо се добивало со употреба на дрвен јаглен во високи печки. Веќе во 1900 г. над 90 % сурово железо се добивало при работа со кокс.

Коксот се добива при загревање на ситен камен јаглен за коксирање на температура од 1000 до 1100 °C без пристап на воздух. Притоа се испаруваат испарливите Каменецери, а парчињата се спречуваат во јака, порозна темносребренеста маса. Јаглените за коксирање претходно се подготвуваат со дробење и обогатување. Со обогатување се намалува содржината на пепелот во јагленот. Јаглената смеса претходно се суши до максимум 6 % влага. Јагленот за коксирање се добива со мешање на повеќе видови јаглени.



Слика. 2.1. Шема на производство на кокс



Слика. 2.2. Кокс

Коксот се произведува во коксни печки. Коксната печка има повеќе комори широки околу 35 – 40 cm, долги 13 – 15 m и високи 4,5 – 5,0 m (слика 2.1).

Коморите се загреваат со посредство на многубројни канали во страничните сидови, каде гори смеса од гасот од високата печка и загреан воздух. На двете тесни страни од комората се монтирани врати. Кога процесот на коксирање ќе заврши, вратите се отвораат и коксот се истиснува во специјален вагон кој го однесува во комори за гасење. Гасењето се врши со вода. Во последно време се применува и т.н. суво гасење. Во специјални комори готовиот кокс се оладува со инертен гас. Топлината на загреаниот инертен гас може да се исползува, додека при воденото гасење добиената пареа не се ползува.

Коксовите печки се постројуваат една до друга, така што образуваат цела батерија.

Од дестилационите продукти се добиваат ценети хемиски Материјали: коксен гас, суров катран, суров бензол и др.

Количината на коксот во однос на преработениот јаглен изнесува околу 75 %, што се вика „извадок на кокс“.

Металуршкиот кокс треба да е рамномерно порозен со светлосребренеста боја. Коксот со темна боја не е доволно жарен, содржи нешто испарливи состојки и има помала цврстина.

Коксот е квалитетно гориво, бидејќи е цврст, согорува без дим и има голем интензитет на согорување. Тоа значи дека може да согори голема количина кокс за кратко време, така што притоа се губи малку топлина и се постигнуваат високи температури. Температурата на палењето на коксот е висока, па во високите и шахтните печки најголем дел согорува дури во долниот дел на печката во зоната на дувниците.

Состав и особини на металуршкиот кокс:

- пепел	8 – 10 %
- цврст јаглерод $C_{\text{фик}}$	85 – 88 %
- O_2	1,0 – 1,3 %
- влага	3,0 – 6,0 %
- волумен на порите	45 – 55
- насипна тежина, t/m^3	640 – 700
- температура на палење, $^{\circ}C$	6500 – 7200

За квалитетот на коксот особено е важна содржината на сулфурот.

Состав на коксниот пепел:

SiO_2	37 – 52 %	CaO	3 – 8 %
Al_2O_3	24 – 30 %	MgO	1 – 3 %
Fe_2O_3	8 – 18 %	P	0,22 – 0,96 %

2.6.2. Д р в е н ј а г л е н (кумур)

Дрвениот јаглен се добива при сува дестилација на дрво, т.е. при загревање без присуство на воздух. При загревањето се добиваат гасни и тврди продукти. Остатокот – тврдиот продукт претставува дрвен јаглен. Испарливите Каменецери се: вода, CO_2 , CO и различни јаглеводороди. Квалитетот на јагленот зависи од времето на загревањето и од температурата. При подолго време

и повисока температура на загревање се добива дрвен јаглен со поголема содржина на јаглерод.

Дрвениот јаглен се добива и на примитивен начин. Дрвата се редат на куп, се покриваат со кал и се запалуваат. Притоа се развива температура од 600 – 700 °C, а содржината на јаглерод може да достигне и 90 %. Но, при таков начин на работа се губат дестилационите продукти.

Денес, дрвен јаглен се добива во покриени печки или реторти, при точно запазување на температурата од 400 до 500 °C. Денешните печки за дрвен јаглен се со непрекинато и прекинато дејство. Предноста на новите методи за производство на кумур е во тоа што можат да се искористат сите хемиски Каменецирии кои можат да најдат примена во хемиската индустрија.

Искористувањето на дрвената маса е помалку од 50 %. Од 100 kg дрво се добиваат 30 – 35 kg дрвен јаглен.

Од металуршка гледна точка дрвениот јаглен има повеќе предности пред коксот. Содржината на пепел е од 0,5 до 2,5 %, додека во коксот е околу 10 %. Содржината на штетните примеси S и P е скоро занемарлива. Порозноста на дрвениот јаглен е 70 – 85 %, додека на коксот е 50 %. Но, поради тоа дрвениот јаглен е значително помалку отпорен на притисок отколку коксот. Тоа го прави неприменлив во современите високи печки.

Дрвениот јаглен е најчисто металуршко гориво и редуцент и содржи: 70 % C, 2 – 3 % H, 5 – 6 % O, 2 – 3 % пепел, 10 – 12 % влага.

Калоричната моќ му е 27000 – 29300 kJ/kg. Волуменската тежина му е 130 – 220 kg/m³. Има темносива боја, лесен е, шупликов и хидроскопен.

Пепелот на дрвениот јаглен, како и оној на коксот, има кисел карактер, во најголема количина е SiO₂.

Добиените метали со помош на дрвен јаглен се од првокласен квалитет, бидејќи тој не содржи штетни примеси кои

би преминале во металот. Но, денес дрвениот јаглен воопшто не се користи, бидејќи е многу скап и е потребна многу голема количина на дрво за негово производство, што условува уништување на шумите.

2.6.3. Полукокс

Во многу земји проблемот на металуршко гориво е многу актуелен, бидејќи количините на камен јаглен за коксирање се недоволни. Затоа во последните години се прават направат напори од помладите јаглени (лигнит и камен јаглен) да се произведуваат металуршки горива кои можат да го заменат коксот. Во тоа се постигнати и делумно успеси. По пат на швелување на помладите јаглени на температури пониски од оние на кои се врши коксирање се добива полукокс со извесни механички особини кои можат да задоволат помали печки.

Ако се спореди составот на коксот и полукоксот добиен од помладите јаглени, ќе се види неговиот послаб квалитет:

	Пепел	C	S
Кокс	9 – 12	84 – 87	0,8 – 1,3
Полукокс	15 – 20	35 – 55	1,2 – 1,6

Отпорноста на притисок на гранулациите преку 20 мм при полукоксот е понеповолна во однос на коксот.

2.7. Течни горива

Во обичниот живот денес течните горива се незаменливи, поради нивната повеќекратна употреба. Но, во металургијата нивната употреба сè уште заостанува зад употребата на тврдите горива. Во последно време се наоѓаат повеќе можности за употреба на течните горива, особено на мазутот.

Течните горива имаат низа предности во однос на цврстите горива, и тоа:

1. практично немаат пепел,
2. ракувањето со нив и регулацијата при нивната употреба е лесна (овозможена е автоКаменецка регулација),
3. лесно се складираат, подобро се искористуваат на складишниот простор, при што има можност за дислоцирање на складот,
4. помали се инвестиционите вложувања за искористување на нивната топлина по кЈ, спрема кЈ од тврдите горива,
5. имаат подобар коефициент на согорување.

Во течните горива, пред сè, спаѓа нафтата и нејзините деривати. Мала количина на течни горива се добива и од дестилатите на цврстите горива. Но, нивното значење е мало во однос на значењето на горивата кои произлегуваат од нафтата.

2.7.1. Н а ф т а

Нафтата, како и другите видови течни горива, има висока топлотна способност, висок степен на согорување и може добро да се транспортира. Таа служи како гориво и како суровина за добивање низа корисни хемиски производи.

Теоријата зборува дека и нафтата настанала, слично како и јаглените, од растителните Каменецерии, со претворање на органската маса во разни јаглородни соединенија. Со процеси кои траат со милениуми доаѓа до собирање на нафтата во одредени зони на земјата. Постојат повеќе теории за настанувањето на

нафтата, но ни една не е напoлно прифатлива. Заедничко им е тоа што сите се сложуваат дека потеклото на нафтата е од органски Каменеџерии.

Нафтата по состав е смеса на разни јаглеводороди. Содржи околу 75 % C и 14 % H₂, пепел 0,2 – 0,3% и влага 1,0 –1,5 %.

Топлотната моќ на нафтата изнесува 420 – 46000 kJ/kg.

Суровата нафта практично не се употребува како гориво, поради тоа што горењето на нафтата би претставувало расфрлување и уништување на разни нејзини ценети фракции, кои наоѓаат далеку повредна примена отколку што е горењето и нејзината експлоатација како топлински извор. Преработката на нафтата се состои во низа операции, меѓу кои се издвојуваат, на пример: фракционата дестилација, крекувањето и приспособувањето на добиените производи. Со фракционата дестилација како гасови се издвојуваат: бензин, керозин, лигроин, газоил. Како остаток од дестилацијата се добива мазут, кој или се употребува како гориво или се подложува на понатамошна преработка. Со крекување на смесата од газоил и мазут, т.е. со загревање до 700 °C под висок притисок од 70 до 100 atm, тешките јаглеводороди се разлагаат и се образуваат лесни јаглеводороди (бензин) кои се кондензираат во ладилници.

При разлагањето на нафтата под обичен притисок на температура од 700 °C (пиролиза) се добива нафтен гас, смола, кокс и др. Од гасната смола се добива вештачки бензин.

Добиените производи од овие операции се приспособуваат на побарувањата од потрошувачките; се отстрануваат сулфурните соединенија, се дотерува бојата, се додаваат антидетонатори и др.

2.7.2. М а з у т

Мазутот нашол широка примена во металургијата за загревање на пламени печки. Тој претставува густа маслена течност со мркоцрна боја, која содржи над 85 % C и 12 % H₂. Неговата топлотна способност изнесува 42 000 kJ/kg и повеќе.

Најважните особини на мазутот кои го одредуваат неговиот квалитет се: вискозитетот, температурата на палењето и температурата на стврднувањето. Мазутот содржи парафин кој е способен да го стврдне при смалување на температурата. Затоа е потребно цевките низ кои тече (се транспортира) мазутот да се загреваат.

Мазутот за употреба во погоните обично се лагува во подземни резервоари, од кои се разнесува до местата на употреба со цевководи кои се загреваат со пара.

Температура на палење се вика температурата на која смесата на мазут и воздух се пали при контакт со пламен. Таа температура е блиска до 100 °C. Температурата на samozapaluvanjeto на мазутот е од 500 до 700 °C.

И покрај добрите квалитети на мазутот како гориво, подобро и поекономично е да се користи за хемиска преработка, а во металургијата да се замени со јагленова прашина, гас и други видови горива.

2.8. Гасовити горива

Гасовитите горива во природата се наоѓаат поретко, а доколку и се наоѓаат, тие се како придружници на нафтените наоѓалишта.

Гасовитите горива, во споредба со тврдите и течните, имаат повеќе предности, меѓу кои треба да се споменат:

1. добро и лесно се мешаат со воздухот,
2. согоруваат практично без пепел и чад, што ја олеснува нивната употреба,
3. согоруваат и во ладна печка,
4. лесно се транспортираат до местото на употреба,
5. одделни гасни горива дозволуваат прегревање, со што е овозможено постигнување повисока температура во печката,
6. лесно се одржуваат на атмосферата во печката, во зависност од технолошката потреба; со регулирање на должината на пламенот може да се постигне редукциона или оксидациона атмосфера,
7. лесно се распределуваат на температурата во печката,
8. горењето лесно се започнува или запира, а работата околу инсталацијата е чиста.

Сите овие предности се причина гасното ложење да се воведе секаде каде што е економски оправдано, а особено таму каде што се бараат високи температури, на пр.. во Сименс-Мартиновите печки, печките за коксирање и др.

Гасните горива кои наоѓаат најчеста примена во основа ги делиме на: природни и вештачки. Од природните, секако, најпознат е природниот гас, кој уште се вика земен гас или метан (бидејќи е по состав со најголем процент на метан). Од вештачките најмногу употребувани се: генераторскиот гас, коксниот гас, гасот од високите печки и др.

2.8.1. Природен гас

Природниот гас обично е многу чист и содржи главно гасовити јаглеводороди од понизок ред (метан, етан). Покрај тоа, содржи уште и бутан пропан, пентан и др. кои лесно се преведуваат во течна состојба. Земниот гас содржи во мали количини и H_2 , CO_2 , H_2S и пари на органски сврзан S, а овие примеси се штетни за употреба при топење на челикот. Богат природен гас содржи 95 – 99 % метан, со мала содржина на етан. Овој гас, бидејќи содржи малку од повисоките јаглеводороди, се вика уште и посен земен гас. Сиромашниот природен гас содржи 35 – 65 % метан, поголема количина на етан и повисоки јаглеводороди, па затоа уште се вика и масен земен гас.

Табела 2.5. Просечен состав на еден гас

	Масен земен гас %	Посен земен гас, %
CH_4	30 – 40	89
CH_2H_6	20 – 30	2,5
C_3H_6	15 – 20 $CO_2 - O_2$	7,6
CO_4H_{10}	4 – 6 H_2	1,0
Повисоки јаглеводороди	3 – 5	

Природниот гас се користи во индустријата како ценето гориво поради неговата висока топлотна моќ која се движи меѓу 33000 и 42 000 kJ/m³. Добра страна на ова гориво е и светлиот пламен кој се добива при неговото согорување, со што се зголемува пренесувањето топлина по пат на радијација. Ова гориво денс се бара сè повеќе, поради што се градат долги гасоводи за транспортирање на гасот на далечини од повеќе илјади километри.

2.8.2. Генераторски гас

Загревната моќ и составот на генераторскиот гас варираат во широки граници, во зависност од Материјалот кој се претвора во гас и од начинот на работа на генераторот. За добивање гас се

користат разни јаглени: камен, мрк јаглен, лигнит. Но можат да се употребат и: кокс, тресет, дрво, слама и др.

Гасот претежно се образува со додавање водена пара во генераторот, со што се зголемува содржината на водородот во гасот (воден генераторски гас). За да се обезбеди уште подобро пренесување на топлината со зрачење се бара во гасот да има што поголема количина на катран (потешки јаглеводороди). Содржината на водената пара во гасот би требало да биде што помала.

Табела 2.6. Состав на основните гасовити горива

	Гас од висока печка	Коксен гас	Коксенгас (од висока печка)	Генераторски гас (мрк јаглен)
Состав на гасот, % CO ₂	7	1,9-2,4	5,7-6,0	3,5-5,0
Тешки јаглеводороди O ₂	-	1,8-2,5	0,8-1,1	0,2-0,4
O ₂	-	0,6-0,8	0,2	-
CO	32	5,5-6,7	21-23	29-30,5
H ₂	2,5	52-57	20-21	21-14
CH ₄	58,5	8-12	40-42	50-52
Содржина на катран g/m ³	-	-	-	25-35
Содржина на влага g/m ³	-	10-25	15-30	70-150
Потребна количина на воздух за согорување	0,82	4-4,3	1,9-2,0	1,5-1,8
Количина/согорен гас вл.	1,65	4,6-4,9	2,7-2,9	2,5-2,7
Волуменска тежина	-	0,4-0,5	1,01	1,18
Загревна моќ (катран) kJ/m ³	1040	4000- 4200	2050-2300	1730

Штетни примеси во генераторскиот гас се разни соединенија на сулфурот, чија количина по правило не би требало да е поголема од 3 kg/m³ гас. Содржината на сулфурот во гасот зависи од употребниот вид јаглен, а може со одредена количина на вар во генераторот да се намали.

2.8.3. Коксен гас

Овој гас има топлотна моќ од приближно 16800 kJ/m^3 . За неговото согорување е потребна голема количина воздух, па затоа топлината на согорениот гас не е доволна, покрај воздухот, да го предгрева и гасот. Тоа ја поедноставува конструкцијата на печката.

Штетните примеси на коксниот гас се, исто така, сулфурните соединенија, чија количина во просек е поголема отколку кај генераторскиот гас. Порано овој гас се употребувал во челичарниците.

2.8.4. Гас од високи печки

Гасот од високите печки кои користат кокс е со мала калорична моќ $3800 - 42000 \text{ kJ/kg}$. Затоа не се користи за топење на челик, бидејќи и предгреан не може да ја даде потребната температура на пламенот. Гасот од високите печки во голема количина се користи во смеса со другите гасови.

2.9. Прашања и одговори

1. Што е основната улога на горивата во металургијата?

Одговор: Да обезбедат топлинска енергија за сушење, пржење, топење, редукција и рафинирање.

2. Кои се главните агрегатни состојби на горивата?

Одговор: Цврсти, течни и гасовити.

3. Од што зависи изборот на гориво во металуршки процес?

Одговор: Од природата на процесот, работната температура, топлинскиот топител и конструкцијата на печката/постројката.

4. Што значи „чистота на горивото“ како услов за примена?

Одговор: Ниска содржина на несогорливи примеси (пепел, минерали) што ја намалуваат топлотната моќ и ја зголемуваат троката/галозите.

5. Зошто „достапност и резерви“ се важни критериуми?

Одговор: За сигурно и економично снабдување, експлоатација и транспорт на долг рок.

6. Што се бара од продуктите на согорување од еколошки аспект?

Одговор: Да бидат што е можно побезопасни за луѓето и опреКаменеца и да ги исполнуваат еколошките стандарди.

7. Што значи „стабилност при складирање“ на горивото?

Одговор: Да не се менуваат својствата и да нема ризик од самозапалување, оксидација или деградација.

8. Зошто е важна механичката цврстина на цврстите горива?

Одговор: За да издржат транспорт и засипување без дробење и без губење на квалитет.

9. Што означува „економска оправданост“ на горивото?

Одговор: Вкупните трошоци (цена, подготовка, транспорт, употреба) да се конкурентни и исплатливи.

10. Кои елементи се типични за органскиот дел на горивата?

Одговор: C, H, O, N, S.

11. Што претставуваат пепелта (A) и влагата (W) во горивото?

Одговор: Непожелни компоненти: пепелта е минерална несогорлива примеса, влагата ја намалува енергетската вредност.

12. Зошто јаглеродот е најважна компонента на горивото?

Одговор: При согорување ослободува значајна количина топлина и често е основа за редукција во печките.

13. Какво значење има водородот во горивото?

Одговор: Дава висока топлотна моќ при согорување (значително поголема од јаглеродот по маса).

14. Зошто азотот во горивото се смета за „баласт“?

Одговор: Обично не учествува во согорувањето и преминува во продуктите непроменет.

15. Зошто кислородот во горивото е непожелен?

Одговор: Го намалува уделот на „горливата маса“ и ја намалува ефективната енергетска вредност.

16. Во кои форми може да се јави сулфурот во горивото?

Одговор: Органски врзан S, пиритен (FeS_2), сулфатен (на пр. CaSO_4), и други сулфатни соединенија.

17. Зошто влагата е особено непожелна компонента?

Одговор: Дел од енергијата се троши за загревање/испарување на водата → се намалува топлотната моќ.

18. Што се „испарливи Каменецирии“ кај цврстите горива?

Одговор: Гасни/парообразни компоненти што се одделуваат при загревање без присуство на воздух.

19. Која е разликата меѓу техничка и целосна (елементарна) анализа на гориво?

Одговор: Техничка: W, A, I (и понекогаш S и калоричност).
Целосна: дополнително елементарен состав на горливата маса (C, H, O, N, S).

20. Како се класифицираат горивата според настанување?

Одговор: На природни и вештачки.

21. Кои се главните постапки за добивање вештачки горива?

Одговор: Облагородување, сува дестилација (коксирање/ќумур), гасификација, дестилација на течни горива и специјални процеси.

22. Што е топлотна моќ на горивото и во кои единици се изразува?

Одговор: Количина топлина добиена со согорување на единица маса/волумен; се изразува во kJ/kg или kJ/m³ (и сл.).

23. Како може да се одреди топлотната моќ?

Одговор: Каменеце/Каменецички (од анализи) и експериментално (калориметар).

24. Кои две компоненти најмногу ја намалуваат топлотната моќ?

Одговор: Влага и пепел (ја намалуваат содржината на согорлива Каменецерија и ја трошат енергијата/создаваат инертен остаток).

25. Зошто металуршкиот кокс е клучно гориво/редуцент во високите печки?

Одговор: Има висока цврстина и порозност, согорува интензивно без чад, обезбедува високи температури и добра пропусливост за гасовите (важно за редукциските реакции).

Поглавје 3 Производство на железо во висока печка

Железото претставува основа на современата металургија и индустрискиот развој. Производството на железо во висока печка е еден од најстарите и најраспространети процеси во светската индустрија. Високата печка овозможува ефикасна редукција на железните оксиди до метално железо со помош на јаглороден моноксид и кокс, при високи температури од околу 2000 °C. Целта на овој текст е детално да се разгледа конструкцијата, процесот, хемиските реакции и современите трендови во производството на железо.

Железото отсекогаш било симбол на технолошкиот напредок. Од првите обиди на човекот да добие метал од каменеста руда, па сè до денешните модерни индустриски постројки, железото останува темел на индустрискиот развој. Во срцето на овој процес стои високата печка – огромна метална конструкција висока повеќе од 30 метри, во која секој дел има своја улога и каде што рудата се претвора во стопено железо.

Кога студентот ќе застане пред високата печка, може да ја замисли како жив организам. На нејзиниот врв се втоваруваат парчиња железна руда, кокс и варовник. Овие Материјали постепено се спуштаат надолу, минувајќи низ температурни зони каде што се одвиваат различни физички и хемиски промени. Во горниот дел се врши сушење и калцинација, во средниот дел започнува редукцијата на железните оксиди, а во долниот дел – каде што владеат температури од над 2000 °C – се случува конечната трансформација: топење на железото и формирање троска.

Воздухот што под висок притисок се вдувува во печката преку страничните дувачи предизвикува бурно согорување на коксот. Овој процес не само што создава огромни количини топлина, туку и го генерира јаглородниот моноксид – гасот што е клучен за редукцијата на железото. Хемиската борба се одвива во темнината на печката: молекулите на јаглородот го одземаат кислородот од железните оксиди, претворајќи ги во чисто метално железо.

Истовремено, варовникот ја игра улогата на „чистач“ – ги врзува нечистотиите од рудата и заедно со силициум диоксидот формира троска. Таа троска, која некогаш се сметала за отпад, денес се користи во градежништво како корисен нуспроизвод. Додека троската нежно плови на површината на стопеното железо, гасовите што излегуваат од врвот на печката се собираат и повторно се користат како гориво во фабриката. Така, ништо не се губи – сè се рециклира во еден индустриски екосистем.

На дното на печката, во огништето, железото се собира како сјајна стопена маса. Кога се испушта, тече во калапи и се стврднува во блокови – леано железо. Тоа железо е основа за понатамошно производство на челик, Материјал од кој се градат мостови, автомобили, бродови и згради ширум светот.

Иако процесот е стар повеќе од два века, современата висока печка не е истата како во минатото. Денес таа е опремена со автоКаменецизација, дигитални сензори и компјутерски модели кои овозможуваат постојана контрола и зголемена

ефикасност. Новите предизвици се насочени кон намалување на емисиите на CO_2 . Наместо само кокс, во процесот се вбригува природен гас, биомаса, па дури и водород. Научниците и инженерите сè повеќе развиваат технологии за директна редукација со водород, каде железото се добива без значителни емисии на јаглерод диоксид – вистинска револуција што ја приближува металургијата кон „зелената“ иднина.

За студентите, разбирањето на високата печка не е само прашање на хемиски равенки и температурни профили. Тоа е приказна за човековата генијалност, за способноста од суров камен да се добие метал кој го обликува светот. Високата печка претставува симбол на индустриската моќ, но и потсетник дека секој технолошки процес мора да се усогласи со природата и да се движи кон одржлив развој.

3.1. Суровини

За правилно функционирање на високата печка се користат следните суровини:

- Железна руда: главен носител на железо (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO)
- Кокс: извор на јаглерод кој служи како редукциско и енергетско средство
- Топител (варовник CaCO_3): служи за врзување на нечистотиите и формирање троска.

Типичен хемиски состав на рудата: Fe_2O_3 (60 – 70 %), SiO_2 (10 – 15 %), Al_2O_3 (5 – 7 %), CaO (2 – 4 %).

Во процесот на производство на железо во високата печка, на врвот на печката се додаваат трите основни суровини: железна руда, варовник и кокс. Овие Материјали имаат строго определена улога во целиот технолошки процес.

Коксот, кој претставува специјално подготвен јаглен, се добива со негово загревање во инертна атмосфера за да се отстранат испарливите компоненти. На овој начин, во коксот останува висока содржина на јаглерод, обично меѓу 80 и 90 %. Благодарение на тоа, коксот има висока калориска моќ и може да служи како основно гориво во високата печка. Во долниот дел од печката коксот согорува и произведува топлина неопходна за редукција на железните оксиди. Покрај тоа, тој е извор на редукциони гасови, пред сè, јаглерод моноксид (CO) и водород (H_2), кои директно учествуваат во хемиските реакции на редукција на железото од рудата.

Варовникот (CaCO_3) се додава во шихтата со цел да дејствува како топител. При високи температури, варовникот се разложува на калциум оксид (CaO) и јаглерод диоксид (CO_2). Калциум оксидот потоа реагира со силикатите и останатите нечистотии што се наоѓаат во железната руда, формирајќи лесно топлива маса позната како троска. Троската има големо значење во процесот, затоа што ги одвојува и ги апсорбира несаканите компоненти, со што се добива почисто железо.

Со оваа комбинација – железна руда како извор на метал, кокс како гориво и редуцент, и варовник како топител – во високата печка се обезбедуваат услови за ефикасна редукција и издвојување на стопено железо, при што истовремено се создава и троска која се одвојува од металот.

Во составот на повеќето руди, покрај железните оксиди, секогаш се наоѓаат и значителни количини на кварц (SiO_2) и различни силикати. Овие минерали се составен дел на карпите и речиси секогаш се присутни како нечистотии во рудата што се користи во високата печка.

Меѓутоа, кварцот и силикатите претставуваат проблем, бидејќи не се топат на температурата што ја постигнува високата печка. Тоа значи дека тие остануваат во цврста состојба и не можат да се одделат од металот само со термички процес.

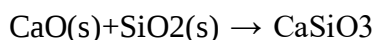
За нивно отстранување се применува важен хемиски метод – додавање на топител. Најчесто тоа е варовникот (CaCO_3), кој при високи температури се распаѓа на калциум оксид (CaO). Овој калциум оксид реагира со силикатите и силициум диоксидот (SiO_2), при што се формира соединение со пониска точка на топење – троска.

Троската има клучна улога, бидејќи ги врзува сите овие нечистотии, се собира на дното на печката и, за разлика од стопеното железо, не се раствора во металот. На овој начин, се овозможува ефикасно раздвојување на чистото стопено железо од несаканите компоненти, а троската се испушта посебно.

Во процесот на работењето на високата печка, високата температура игра клучна улога во хемиските трансформации на суровините. Една од најважните реакции е разградувањето на варовникот (CaCO_3). Под влијание на топлината, варовникот се калцинира, односно се разложува на калциум оксид (CaO) и јаглерод диоксид (CO_2). Оваа реакција е позната како калцинација:



Добивањето калциум оксид е од суштинско значење, бидејќи тој е основен оксид кој реагира со силициум диоксидот (SiO_2), една од најчестите нечистотии во рудата. Како резултат на таа реакција се формира калциум силикат (CaSiO_3) – соединение со пониска точка на топење кое претставува главна компонента на троската:



Формирањето на троска има повеќекратна функција. Прво, таа овозможува врзување и одвојување на нечистотиите од стопеното железо, со што се добива метал со повисок степен на чистота. Дополнително, троската создава заштитен слој над стопеното железо во печката и го штити од реоксидација со контакт со гасовите.

Покрај својата улога во металуршкиот процес, троската има и голема индустриска примена. Таа често се користи како суровина при изградба на патишта, каде служи како стабилизирачки и зајакнувачки Материјал. Исто така, троската може да се комбинира со цемент, при што се добиваат градежни Материјали со зголемена механичка отпорност и подобрени својства.

Табела 3.1. Температурни зони во високата печка

Зона	Температура (°C)	Главни процеси
Горна зона	200 – 800	Сушење и калцинација
Средна зона	800 – 1400	Редукција на железни оксиди
Долна зона	1400 – 2000	Согорување на кокс, топење на железо и троска

3.2. Конструкција на висока печка

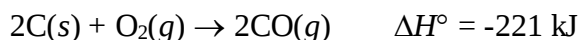
Високата печка има висина од 25 до 35 метри и дијаметар од 8 до 12 метри. Се состои од неколку делови:

- Огниште (тука се собира стопеното железо)
- Дувачи за вдување на воздух

- Цилиндричен дел со различни температурни зони
- Горен дел (вратило) за додавање суровини.

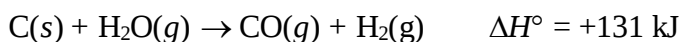
Печката работи континуирано, со капацитет од илјадници тони железо дневно.

За да се обезбеди соодветна температура и услови за редукција во високата печка, воздухот се вдувува под висок притисок во долниот дел на печката. Овој процес се изведува преку специјални млазници и е од клучно значење за целосното согорување на кокосот. Кога кислородот од воздухот ќе дојде во контакт со јаглеродот во кокосот, настанува силно егзотермна реакција:



Оваа реакција ослободува голема количина топлина и ја подигнува температурата во долниот дел на печката на околу 2000 °C. Со тоа се создаваат услови за топење на рудата и за развивање редукциони гасови, кои потоа се движат нагоре низ печката.

Покрај кислородот, воздухот што се вдувува содржи и водена пареа (H₂O). Таа реагира со кокосот во една ендотермна реакција:

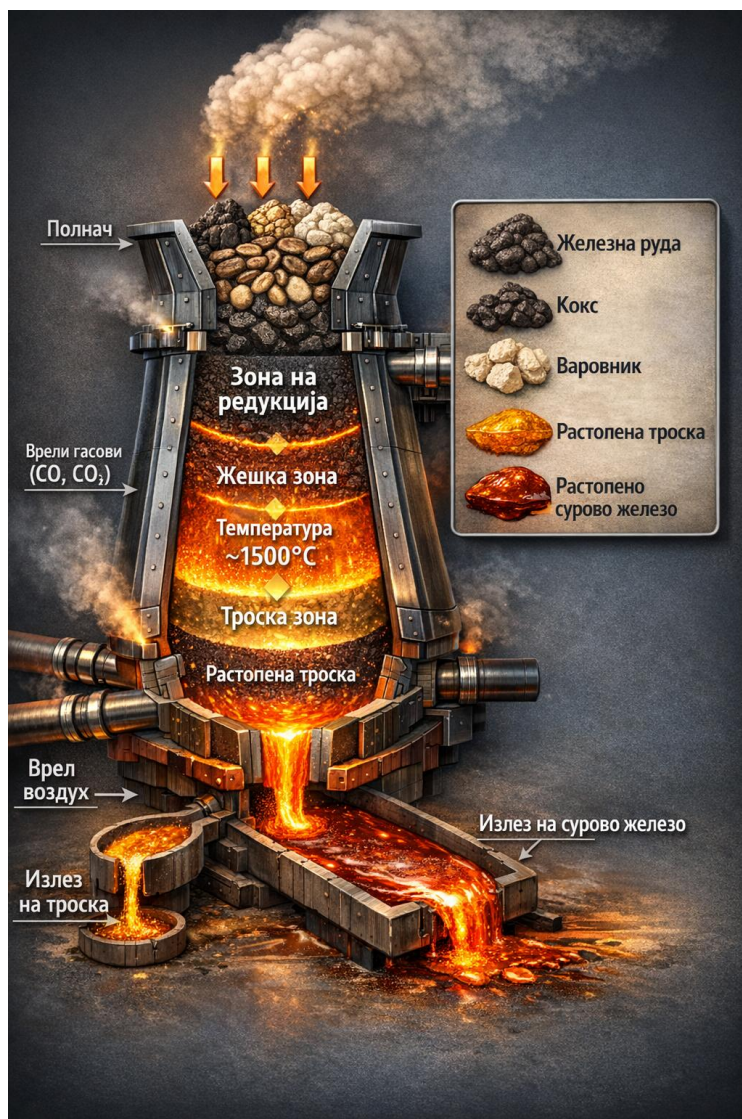


Оваа реакција не само што произведува дополнителни редукциони гасови – јаглерод монооксид (CO) и водород (H₂) – туку има и уште една важна функција.

Бидејќи реакцијата е **ендотермна** (апсорбира топлина), таа придонесува за регулирање на внатрешната температура на печката. На овој начин, преку вниКаменецелно додавање водена пареа, високата печка може да се олади локално без да се прекинат или значително да се нарушат хемиските реакции што се одвиваат во неа.

Со оваа комбинација – егзотермните реакции на согорување на јаглеродот и ендотермната реакција со водената пареа – се одржува динамичка термичка рамнотежа во печката,

што е предуслов за стабилно и континуирано производство на стопено железо.



Слика 3.1. Висока печка

3.3. Детален опис на процесите во високата печка

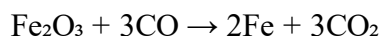
Производството на железо во високата печка претставува комплексен технолошки процес кој вклучува повеќе поврзани физички и хемиски појави. За студентите од металургија, машинство и наука за Материјалите, разбирањето на овој процес е суштинско за натамошна примена во индустријата.

Основните процеси кои се одвиваат се:

- Сушење и калцинација на суровините
- Хемиска редукција на железните оксиди
- Согорување на коксот и создавање на јаглерод моноксид
- Формирање и исфрлање на троска
- Стапување на металот во огништето.

3.3.2. Пресметки на редукција

Пресметката на степенот на редукција е важна за оптимизација на процесот. Да ја разгледаме редукцијата на Fe_2O_3 до Fe:



За 1 мол Fe_2O_3 (160 g) се потребни 3 мола CO (84 g). Оттука, односот меѓу јаглерод и железо во реакцијата може да се пресмета и да се користи при технолошки баланс.

Во завршната фаза на процесот во високата печка, стопеното железо се собира во долниот дел на печката, под слојот на троска. Кога ќе се акумулира доволна количина, тоа се отстранува преку специјални отвори и се собира во леаници или во преливни канали за понатамошна обработка.

Над стопеното железо плови слојот на **троска**, која поради својата помала специфична тежина лесно се одвојува од металот. Овој слој служи како заштита од повторна оксидација на железото и се испушта посебно, по што може да најде примена во

градежништвото (на пример, во патоградба или како додаток во цементната индустрија).

Табела 3.2. Хемиски состав на производите

Производ	Главни компоненти	Содржина (%)
Леано железо	Fe, C, Si, Mn, P, S	Fe > 93 %, C 3 – 4 %
Троска	CaSiO ₃ , Al ₂ O ₃ , MgO	CaSiO ₃ ~ 40 %, Al ₂ O ₃ ~ 15 %
Високопечен гас	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂	N ₂ ~ 50 %, CO ~ 25 %

Металот што се добива во оваа фаза се нарекува сурово железо или гусано железо. Иако е основен производ на високата печка, тоа не е чисто железо, туку содржи различни примеси кои влијаат врз неговите својства. Составот на суровото железо обично вклучува:

- јаглород (C): 4 – 5 %,
- силициум (Si): 0,6 – 1,2 %,
- манган (Mn): 0,4 – 2,0 %,
- и помали количества на сулфур (S) и фосфор (P).

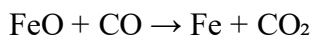
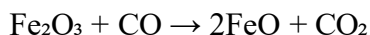
Овој состав му дава на суровото железо одредена цврстина, но истовремено и голема кршливост. Затоа, тоа мора понатаму да се обработува – најчесто преку процеси на преработка во челик, каде што се намалува содржината на јаглород и нечистотии, со цел да се добијат Материјали со многу поширока индустриска примена.

Формираното железо во оваа почетна фаза е познато под името „сурово железо“ или „чугун“. Неговата хемиска композиција е далеку од чист метал: содржи околу 4 – 5 % јаглород, 0,6 – 1,2 % силициум, 0,4 – 2,0 % манган, како и извесни количества сулфур и фосфор. Овие нечистотии и високиот процент на јаглород му даваат на чугуно висока тврдост, но истовремено и кршливост, што го прави неподобен за директна индустриска примена.

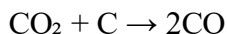
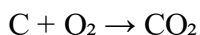
Токму поради ова, суровото железо мора да се подложи на дополнителна металуршка обработка, со цел да се намали содржината на јаглород и да се елиминираат штетните примеси.

Со понатамошни процеси како рафинација, конверзија во челик или леано железо, овој полупроизвод се трансформира во квалитетен Материјал кој ги задоволува барањата на современата индустрија. На тој начин, чугунот претставува основен меѓупроизвод кој ја поврзува примарната металургија со развиената челична индустрија.

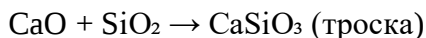
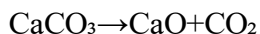
Редукцијата на железо се одвива преку неколку фази:



Согорување на кокс:



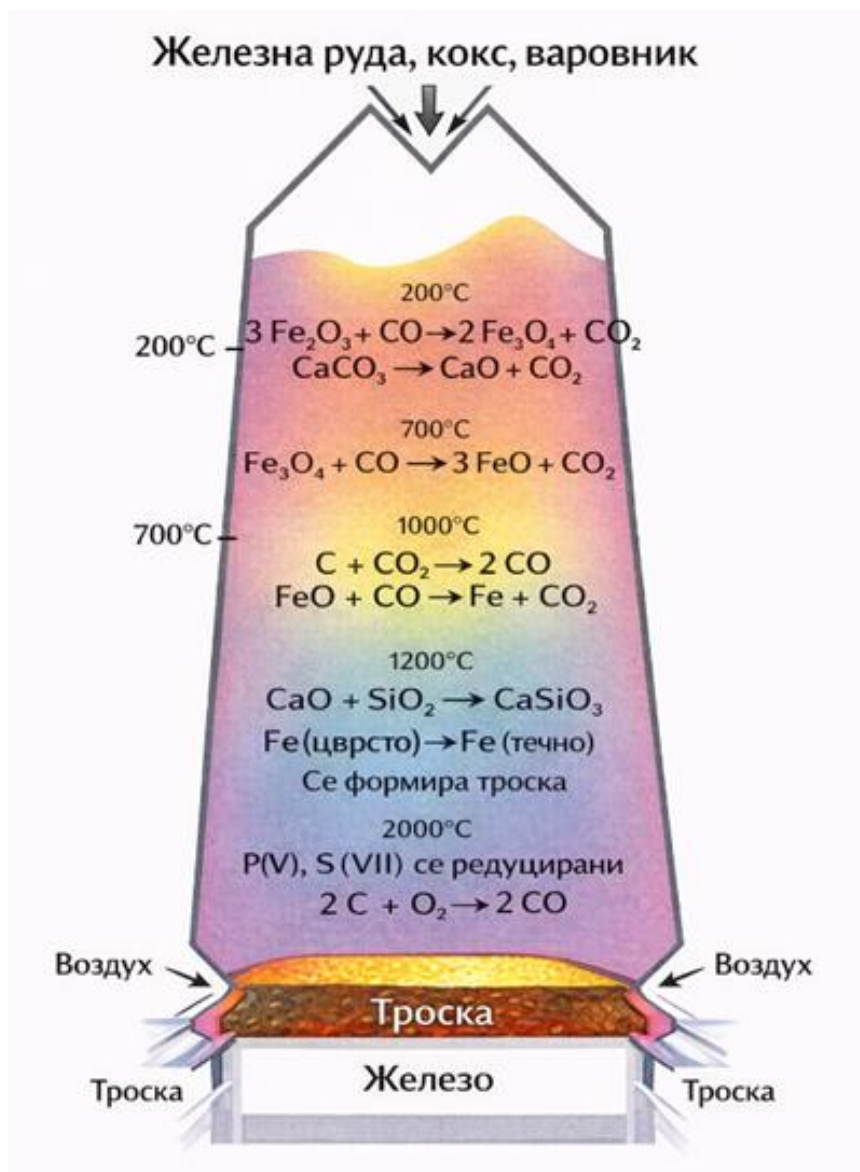
Топител и троска:



Вкупната топлина во печката доаѓа од согорувањето на коксот и од егзотермните реакции. Температурниот градиент е критичен за правилно одвивање на редукцијата.

Топлински загуби се јавуваат преку:

- Гасовите што излегуваат од врвот
- Троската
- Радијационски загуби преку сидовите



Слика 3.2. Напречен пресек на висока печка

3.4.Производи

Главните производи од високата печка се:

1. Сиво леано железо (3 – 4 % C)
2. Троска (CaSiO_3 , Al_2O_3 , MgO – се користи во градежништво)
3. Високопечен гас (CO , CO_2 , N_2 – се користи како гориво).

Леаното железо претставува метал добиен со претопување на суровото железо и со делумно отстранување на нечистотиите, како што се фосфорот и сулфурот. Овој процес овозможува да се добие Материјал со посакувани својства за леење и обликување.

Една од карактеристиките на леаното железо е неговиот многу низок вискозитет во стопена состојба. Тоа значи дека металот е лесно течен и може да ја исполни секоја форма на калапот без да се намали значително неговиот волумен при зацврстување. Благодарение на тоа, леаното железо е идеално за изработка на одлеаноци со сложена форма и голема прецизност.

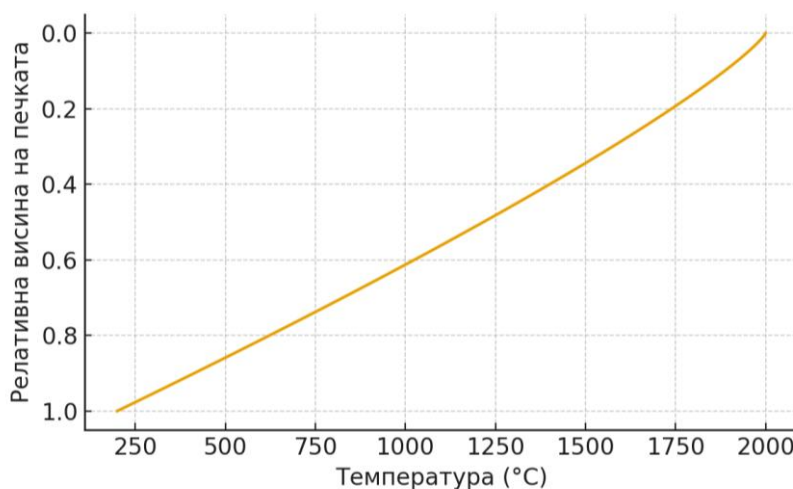
Сепак, леаното железо има и сериозни недостатоци. Тоа останува многу нечисто, со содржина на јаглерод до околу 4 %. Високата концентрација на јаглерод му дава на металот висока цврстина, но истовремено го прави и многу кршлив. Наместо да се деформира под удар или притисок, леаното железо има тенденција да пука, што значително ја ограничува неговата употреба во современата индустрија.

Во минатото, леаното железо широко се користело за изработка на разни одлеаноци, но денес неговата примена е значително намалена со развојот на нови легури и со масовното производство на челик, кои имаат подобра жилавост, поголема издржливост и поширока технолошка примена.

3.5.Современи трендови

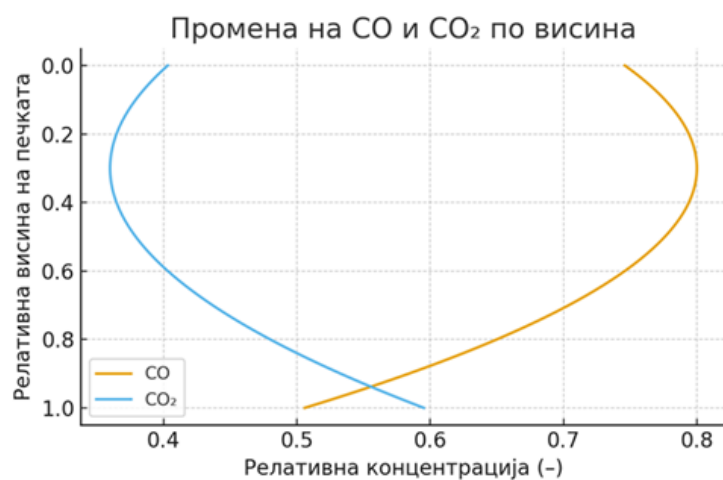
Современите високи печки сè почесто применуваат напредни системи за автоКаменецизација, дигитални сензори и компјутерско моделирање, со цел оптимизација на технолошките

параметри и подобра контрола на процесот. Преку континуирано следење на температурата, составот на гасовите и протокот на Материјалите, се овозможува зголемување на енергетската ефикасност и стабилноста на работата. Во насока на намалување на емисијата на CO_2 , сè почесто се применува инјектирање на природен гас, биомаса или водород како делумна замена на коксот. Паралелно со тоа, интензивно се развиваат технологии за директна редукција на железо (DRI) со употреба на водород, кои се сметаат за клучен елемент на концептот на „зелена металургија“.



Слика 3.3. Температурен профил по висина на високата печка

Високата печка претставува најважен и најраспространет индустриски процес за производство на железо во светски рамки. Иако процесот е енергетски интензивен и поврзан со значителни емисии на стакленички гасови, тој сè уште останува најекономичен метод за добивање сурово железо во големи количини. Поради тоа, модерните развојни трендови се насочени кон зголемување на искористеноста на суровините, подобрување на енергетската ефикасност, намалување на негативното влијание врз животната средина и постепено воведување обновливи извори на енергија во металуршките процеси.



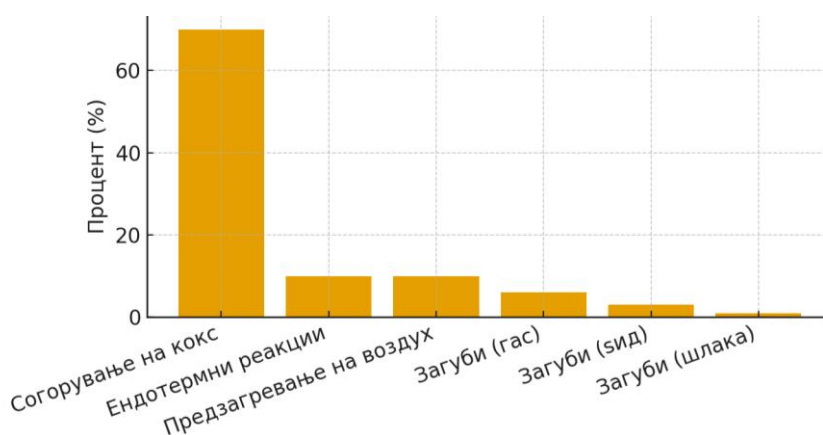
Слика 3.4. Промена на релативни концентрации на CO и CO₂ по висина

3.6. Енергетски и масен биланс

За студентите од инженерските науки, важно е да се разбере принципот на енергетски и масен биланс. Секој килограм железо добиен во печката е резултат на сложен сет на влезови (руда, кокс, топител) и излези (железо, троска, гасови, загуби).

Пример за масен биланс (на 1000 kg руда со 60 % Fe_2O_3):

- 600 kg $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 420$ kg Fe (теоретски добивка)
- 250 kg кокс $\rightarrow 220$ kg C
- 150 kg варовник $\rightarrow 80$ kg CaO (за троска)



Слика 3.5. Енергетски биланс

3.5.1. Формула за енергетски биланс

$$Q_{\text{вкупно}} = Q_{\text{согорување}} + Q_{\text{реакции}} - Q_{\text{загуби}}$$

каде:

- $Q_{\text{согорување}} = m \cdot \Delta H$ (топлина ослободена при согорување на кокс)
- $Q_{\text{реакции}} = \Sigma \Delta H$ (топлина на хемиски реакции)
- $Q_{\text{загуби}} = Q_{\text{гасови}} + Q_{\text{троска}} + Q_{\text{сидови}}$

3.7. Производство на челик

Суровото железо, иако е основен производ на високата печка, има ограничена примена во индустријата во својата првобитна форма. Тоа е кршлив Материјал, кој поради високата содржина на јаглерод и нечистотии не може директно да се користи за изработка на конструкции или алати.

Вообичаено, суровото железо веднаш по неговото производство во високата печка се лее и се транспортира во стопена состојба. Овој производ се нарекува „топол метал“, и во таква форма се испраќа до фабриките за челик, додека сè уште е жежок. На овој начин се избегнува повторно загревање и се заштедува енергија.

Следната клучна фаза е рафинирањето на железото во челик. Ова се изведува во специјални садови наречени конвертори. Во нив, нечистотиите како јаглерод, силициум, манган, сулфур и фосфор се отстрануваат преку процес на оксидација.

Оксидирачкиот агенс што се користи во конверторите е чист кислород (O_2) или мешавина од кислород со аргон (Ar). Важно е да се нагласи дека обичен воздух не смее да се користи. Причината е присуството на азот (N_2) во воздухот, кој при високите температури реагира со железото и формира железни нитриди. Овие соединенија го прават Материјалот уште покршлив и непогоден за понатамошна употреба.

Затоа, процесот на конверзија со кислород е клучен чекор кој го трансформира суровото железо во челик – материјал со многу поширока примена, подобра жилавост и контролирани механички својства.

Производството на челик претставува клучна фаза во металуршкиот процес, при што од сурово железо со висока содржина на јаглерод и нечистотии се добива Материјал со значително подобрени својства. Основниот принцип на овој процес се заснова на вдување кислород (O_2) директно во стопениот метал.



Слика 3.6. BOF Конвертор за железо

Кислородот реагира егзотермично со јаглеродот (C), силициумот (Si) и останатите нечистотии. Овие реакции ослободуваат голема количина топлина, што овозможува процесот да се одвива без дополнително загревање. При тоа, јаглеродот и сулфурот се отстрануваат како гасовити соединенија

– јаглерод монооксид (CO) и сулфур диоксид (SO₂).

Во случајот на силициумот, тој се оксидира до силициум диоксид (SiO₂), кој не испарува туку се врзува со калциум оксидот (CaO) во троската. На овој начин, SiO₂ и останатите оксиди на нечистотиите се апсорбираат во троската, која се одвојува од металот.

Откако ќе заврши процесот на оксидација и прочистување, стопената содржина се истура. Во оваа фаза, металурзите имаат можност да додадат различни легирачки елементи (како што се: манган, хром, никел, ванадиум или молибден) со цел да се добијат челици со специфични својства – на пример, отпорност на корозија, поголема жилавост или висока цврстина.

Така, од кршливото и нечисто сурово железо, преку контролирани хемиски реакции и вниКаменецелно легирање, се добива **челик** – Материјал кој претставува основа на современата индустрија и градителство.

3.8. Видови на железо и челик

Железото и челикот претставуваат основа на современата индустрија. Во зависност од содржината на јаглерод и начинот на обработка, се добиваат различни видови со карактеристични својства и примена.

3.8.1. Ковано железо

Кованото железо претставува метал во кој јаглеродот е речиси целосно отстранет. Како резултат, Материјалот е многу мек и лесен за обработка, со висока жилавост и отпорност на корозија. Во минатото било масовно користено за огради, врати и декоративни конструкции. Денес, поради технолошкиот напредок и појавата на поевтини алтернативи, кованото железо речиси и не се произведува комерцијално, освен за уметнички и специјализирани цели.

3.8.2. Мек челик (нискојаглероден челик)

Овој тип челик содржи приближно **0,25 % јаглерод**. Тој е поцврст и потврд од чистото железо, но, сепак, доволно пластичен за лесно обликување. Благодарение на овие својства, мекиот челик има многу широка примена во индустријата. Се користи за изработка на жица, автомобилски каросерии, метални носачи, конструкции за згради и мостови, како и во апарати за домаќинство. Неговата комбинација на цврстина и жилавост го прави најчесто користен вид челик во секојдневниот живот.

3.8.3. Високојаглероден челик

Високојаглеродниот челик содржи до **1,5 % јаглерод**, што му дава извонредна цврстина и тврдина. Сепак, со зголемената содржина на јаглерод, овој тип челик станува и покршлив, односно има мала жилавост и лесно пука при големи оптоварувања. Затоа се користи главно во апликации каде што е потребна висока отпорност на абеење, како што се сечила за алати, ножеви, длета, пружини, сидарски и градежни профили.

Покрај основните видови како ковано железо, мек и високојаглероден челик, постојат и специјални легури на челик кои се добиваат со додавање различни елементи. Овие легирани

челици имаат уникатни својства и наоѓаат примена во најразлични индустриски области.

3.8.4. Не'рѓосувачки челик (Stainless steel)

Не'рѓосувачкиот челик претставува легура на железо со хром и никел, а често и со други елементи во помали концентрации. Благодарение на хромот, овој Материјал развива заштитен оксиден слој на својата површина, кој спречува понатамошна корозија. Затоа, не'рѓосувачкиот челик е отпорен на 'рѓосување и киселинска средина.

Примената е многу широка и вклучува:

- прибор за јадење,
- кујнски садови и апарати,
- медицински инструменти,
- градежни елементи и фасади.

3.8.5. Титан челик (*Titanium steel*)

Титан челик се добива со додавање **титан** во железо. Оваа легура е позната по својата висока отпорност на високи температури и оксидација, што ја прави исклучително ценета во напредната технологија.

Примената на титан челик вклучува:

- гасни турбини,
- делови од авионски и вселенски летала,
- опрема што работи во екстремни услови.

3.8.6. Мангански челик (*Manganese steel*)

Манганскиот челик е легура во која железото се комбинира со манган. Овој челик е познат по својата исклучителна цврстина и отпорност на абеење. Има способност да се зајакнува при удар, што го прави особено корисен за компоненти изложени на големи механички напрегања.

Примената на мангански челик вклучува:

- машини за дробеење камен и руда,

- железнички пруги и стрелишта,
- воени шлемови и заштитна опрема.

3.9. Современи трендови во металургијата

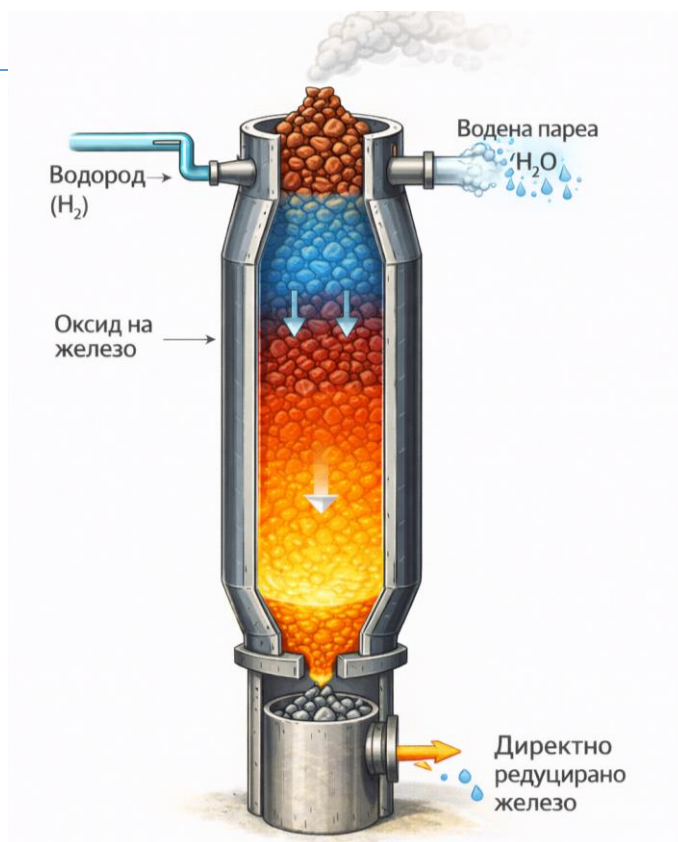
Современиот пристап во металургијата сè поинтензивно се насочува кон намалување на емисиите на стакленички гасови, пред сè, јаглерод диоксид (CO_2), и кон развој на климатски неутрални технологии, во согласност со глобалните стратегии за одржлив развој, Европскиот зелен договор и целите за декарбонизација на индустриското производство. Металуршката индустрија, како еден од најголемите индустриски потрошувачи на енергија, има значителна одговорност, но и потенцијал за трансформација кон поодржливи технолошки решенија.

Традиционалното производство на железо во висока печка претставува процес со висока енергетска интензивност и значителен извор на CO_2 , главно поради употребата на кокс како редуциско средство и гориво. При редуцијата на железните оксиди со јаглерод и јаглерод моноксид, неизбежно се создава јаглерод диоксид, што ја прави оваа технологија еколошки проблеМатична во контекст на современите климатски барања. Оваа состојба ја наметнува потребата од воведување на алтернативни процеси кои ќе обезбедат исто или повисоко технолошко ниво, но со значително помало влијание врз животната средина.

3.9.1 Водород како редуциско средство

- Основа на декарбонизираната металургија

Во таа насока, употребата на водород (H_2) како редуциско средство се смета за една од најперспективните технологии за иднината на производството на железо. Главната предност на водородот лежи во фактот дека при редуцијата на железните оксиди, како краен продукт се создава водена пара (H_2O), наместо јаглерод диоксид. Ова овозможува драстично намалување, па дури и елиминација на директните CO_2 емисии од процесот на редуција.



Слика 3.7. Принцип на директна редукција на железо со водород (H_2 -DRI)

Процесот на директна редукција со водород, познат како H_2 -DRI (*Hydrogen Direct Reduced Iron*), се одвива при пониски температури во споредба со високата печка, најчесто во вертикални реактори или ротациони печки. Во овие услови, железните оксиди (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) постепено се редуцираат до метално железо со контролирана кинетика на реакциите, што овозможува подобра енергетска ефикасност и стабилен квалитет на добиениот производ.

Добиеното директно редуцирано железо (DRI) најчесто се користи како полупроизвод во електролачни печки (EAF) за производство на челик. Комбинацијата на H_2 -DRI технологијата со електролачни печки, напојувани со електрична енергија од обновливи извори, претставува интегриран технолошки синџир со значително намален јаглероден отпечаток и висок степен на флексибилност во производството.

3.9.2. Интеграција на обновливи извори на енергија

- Кружна економија

Дополнителна важна насока во современата металургија е интеграцијата на обновливи извори на енергија, како што се сончевата и ветерната енергија, во металуршките процеси.



Слика 3.8. Концепт на кружна економија во металургијата

Ова е особено значајно за електролачните печки, електролитските процеси и помошните системи (компресори, пумпи, системи за ладење), каде што електричната енергија има доминантна улога. Со ова се намалува зависноста од фосилните горива и се подобрува вкупната енергетска одржливост на постројките.

Паралелно со тоа, се развиваат и технологии за повторна употреба и рециклирање на индустриски отпадни Материјали, како што се металуршките троски, пращината од филтрационите

системи и процесните гасови. Троските, на пример, сè почесто се користат како секундарни сировини во градежништвото, цементната индустрија или како извор на вредни елементи. Овој пристап е во согласност со концептот на кружна економија, каде отпадот од еден процес станува ресурс за друг.

3.9.3. Образовно и инженерско значење

Производството на железо, без разлика дали станува збор за традиционални или современи технологии, претставува комплексен технолошки процес кој ги обединува знаењата од хемијата, физиката, термодинамиката, кинетиката на реакции и инженерството на Материјали. За студентите по металургија, разбирањето на овие процеси е од клучно значење, бидејќи обезбедува солидна теоретска основа и практична подготвеност за работа во индустриски капацитети, како и за вклучување во научноистражувачки и развојни проекти.

Иднината на металургијата лежи во развојот на нови, енергетски ефикасни и еколошки прифатливи технологии кои ќе овозможат конкурентно производство, одржлив економски раст и долгорочно зачувување на животната средина. Улогата на идните металуршки инженери ќе биде клучна во трансформацијата на индустријата кон „зелена металургија“, каде што техничкото знаење, иновациите и еколошката одговорност ќе бидат неразделно поврзани.

3.9. Прашања и одговори

4. Кои се трите основни суровини во високата печка и нивната улога?

Одговор: Железна руда (извор на Fe), кокс (гориво и редуцент), варовник CaCO_3 (топител за врзување нечистотии и формирање троска).

5. Која е основната цел на процесот во високата печка?

Одговор: Редукција на железните оксиди до метално (стопено) сурово железо и одвојување на нечистотиите во вид на троска.

6. Кој гас е главниот редукционен агенс во печката?

Одговор: Јаглерод монооксид (CO).

7. Како се создава CO во високата печка?

Одговор: Преку реакции на согорување и гасификација:
 $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$; $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$.

8. Која е клучната реакција за редукција на Fe_2O_3 со CO?

Одговор: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$.

9. Наведете ја степенестата редукција на железните оксиди (по фази).

Одговор: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$, со CO како редуцент (во пракса преку повеќе меѓупроизводи).

10. Која е улогата на коксот покрај тоа што е гориво?

Одговор: Создава редукциони гасови (CO, делумно H_2) и обезбедува механичка носивост/пропустливост на шихтата.

11. Што е топител и зошто се додава?

Одговор: Топител (најчесто CaCO_3) е Материјал што врзува нечистотии и овозможува формирање лесно топлива троска.

12. Што претставува калцинација на варовник?

Одговор: Термичко разложување: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

13. Која е главната реакција за формирање троска со SiO_2 ?

Одговор: $\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3$ (троска).

14. Зошто троската „плови“ над стопеното железо?

Одговор: Поради помалата густина во однос на металот.

15. Која е функцијата на слојот троска над металот во печката?

Одговор: Го штити металот од реоксидација и собира оксиди/нечистотии.

16. Кои се типични температурни зони во високата печка?

Одговор: Горна (сушење/калцинација), средна (редукција), долна (согорување на кокс и топење).

17. Каде се вдувува воздухот и зошто е тоа критично?

Одговор: Во долниот дел преку дувачи/млазници; обезбедува кислород за согорување и создавање висока температура и CO.

18. Која реакција создава дополнителни редукциони гасови со водена пареа?

Одговор: $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ (ендотермна).

19. Кои се главните производи од високата печка?

Одговор: Сурово (леано) железо, троска и високопечен гас.

20. Кој е приближен состав на високопечниот гас?

Одговор: Главно N_2 , CO, CO_2 и H_2 (со значителен удел на N_2 и CO).

21. Каков е карактеристичниот состав на суровото железо од висока печка?

Одговор: Fe со 3–4(до 5)% C и примеси Si, Mn, P, S.

22. Зошто суровото железо не се користи директно како конструкциски Материјал?

Одговор: Поради високата содржина на јаглерод и нечистотии → висока кршливост.

23. Кои се современите трендови за намалување на CO_2 во производството на железо?

Одговор: Инјектирање природен гас/биомаса/водород, развој на H_2 -DRI и интеграција на обновлива електрична енергија (особено со EAF).

ИСПИТНА ЗАДАЧА

Тема: Производство на железо во висока печка – масен и енергетски биланс (поедноставен)

1) Зададени услови (референтна основа)

Да се изработи поедноставен материјален и енергетски биланс за висока печка на основа:

Референтна шаржа:

Железна руда: 1000 kg, со состав (масени %):

$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 60\%$

$\text{SiO}_2 = 14\%$

$\text{Al}_2\text{O}_3 = 6\%$

$\text{CaO} = 3\%$

Остаток (јаловина/инертно) = 17%

Кокс: 250 kg, со:

$\text{C} = 90\%$

Пепел = 10% (се смета дека целосно оди во троска)

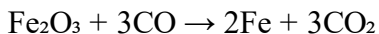
Варовник: CaCO_3 – непозната количина (x kg)

Се додава само за врзување на SiO_2 во троската.

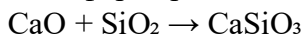
Претпоставки за поедноставување:

Железото се добива само од Fe_2O_3 и редукцијата е целосна.

Редукцијата се врши со CO според:



Троската се формира главно како CaSiO_3 според:

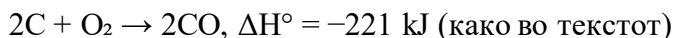


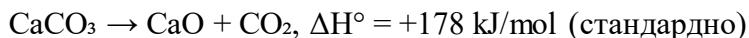
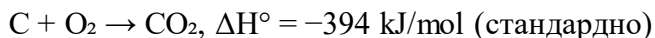
Варовникот калцинира:



Суровото железо (“топол метал”) содржи 4% C (масено).

За енергетски биланс земи:





За да се обезбеди топлина, се претпоставува дека дополнителни 60 kg C од коксот согоруваат до CO_2 за покривање на загревање/топење и загуби (поедноставување).

2) Барања (што да се пресмета)

(а) Количина CaO потребна за врзување на SiO_2 и потребна маса варовник CaCO_3 .

(б) Теоретска количина Fe добиена од Fe_2O_3 и маса на “топол метал” (со 4% C).

(в) Поедноставена табела „Влез/Излез“ (kg).

(г) Поедноставен масен биланс за главни продукти: топол метал, троска, CO_2 (и N_2 од воздух).

(д) Поедноставен енергетски биланс: $Q_{\text{влез}}$ (од согорување) и $Q_{\text{потрошувачка}}$ (калцинација + „останато“).

РЕШЕНИЕ (чекор-по-чекор)

Чекор 1: Количина SiO_2 во рудата

$$\text{SiO}_2 = 14\% \text{ од } 1000 \text{ kg} \Rightarrow m(\text{SiO}_2) = 140 \text{ kg}$$

$$\text{Молярна маса: } M(\text{SiO}_2) = 60.08 \text{ kg/kmol}$$

$$n(\text{SiO}_2) = 140 / 60.08 = 2.33 \text{ kmol}$$

Чекор 2: Потребен CaO за врзување на SiO_2 (CaSiO_3)



$$\text{Значи: } n(\text{CaO}) = n(\text{SiO}_2) = 2.33 \text{ kmol}$$

$$M(\text{CaO}) = 56.08 \text{ kg/kmol}$$

$$m(\text{CaO})_{\text{потребно}} = 2.33 \times 56.08 = 130.7 \text{ kg CaO}$$

$$\text{Во рудата веќе има } \text{CaO} = 3\% \text{ од } 1000 \text{ kg} = 30 \text{ kg CaO}$$

Затоа дополнително CaO од варовник:

$$m(\text{CaO})_{\text{доп}} = 130.7 - 30 = \mathbf{100.7 \text{ kg CaO}}$$

Чекор 3: Потребна маса варовник CaCO_3

Од калцинација: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

Од 100 kg CaCO_3 се добива 56 kg CaO (масен фактор 0.560)

$$m(\text{CaCO}_3) = 100.7 / 0.560 = \mathbf{179.8 \text{ kg CaCO}_3}$$

CO_2 од калцинација: (44/100) од CaCO_3

$$m(\text{CO}_2)_{\text{калц}} = 0.44 \times 179.8 = \mathbf{79.1 \text{ kg CO}_2}$$

Чекор 4: Количина Fe од Fe_2O_3

Fe_2O_3 во рудата = 60% од 1000 kg = 600 kg Fe_2O_3

$$M(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 159.69 \text{ kg/kmol}$$

$$n(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 600 / 159.69 = 3.76 \text{ kmol}$$

Во 1 kmol Fe_2O_3 има 2 kmol Fe $\Rightarrow n(\text{Fe}) = 2 \times 3.76 = 7.52 \text{ kmol Fe}$

$$M(\text{Fe}) = 55.85 \text{ kg/kmol}$$

$$m(\text{Fe}) = 7.52 \times 55.85 = 419.4 \text{ kg Fe}$$

Чекор 5: Маса на „топол метал“ (4% C)

Топол метал има 96% Fe (по маса), 4% C:

$$m(\text{топол метал}) = m(\text{Fe}) / 0.96 = 419.4 / 0.96 = 436.9 \text{ kg}$$

$$\text{Јаглород во метал: } 0.04 \times 436.9 = 17.5 \text{ kg C}$$

Чекор 6: Потребен CO за редукција и CO_2 од редукција

Реакција: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$

За 1 kmol Fe_2O_3 треба 3 kmol CO:

$$n(\text{CO}) = 3 \times 3.76 = 11.28 \text{ kmol CO}$$

$$m(\text{CO}) = 11.28 \times 28.01 = 315.8 \text{ kg CO}$$

CO_2 од редукција: $n(\text{CO}_2) = 11.28 \text{ kmol}$

$$m(\text{CO}_2)_{\text{ред}} = 11.28 \times 44.01 = 496.2 \text{ kg CO}_2$$

Чекор 7: Карбонска потрошувачка (поедноставено)

C за создавање CO (идеално): $1 \text{ mol C} \rightarrow 1 \text{ mol CO}$

$$n(\text{C})_{\text{за CO}} = 11.28 \text{ kmol} \Rightarrow m(\text{C}) = 11.28 \times 12.01 = 135.4 \text{ kg C}$$

Дополнително дадено: 60 kg C согоруваат до CO_2 за

топлина.

Вкупен C потрошен:

за CO: 135.4 kg

за CO₂: 60.0 kg

растворен во метал: 17.5 kg

Вкупно ≈ 212.9 kg C

Достапен C од кокс:

$250 \times 0.90 = 225$ kg C

$\Rightarrow$ останува мал „резервен“ C $\approx 225 - 212.9 = 12.1$ kg C

(може да се смета како неизреагиран/загуба во поедноставување)

Чекор 8: Троска (поедноставено)

Главна компонента од $\text{SiO}_2 + \text{CaO} \rightarrow \text{CaSiO}_3$

$m(\text{CaSiO}_3) \approx m(\text{SiO}_2) + m(\text{CaO})_{\text{вкупно}} = 140 + 130.7 = 270.7$ kg

Плус Al₂O₃ од рудата: 6% $\rightarrow 60$ kg

Плус инертно/јаловина: 17% $\rightarrow 170$ kg

Плус пепел од кокс: 10% од 250 $\rightarrow 25$ kg

Вкупна троска:

$m(\text{троска}) \approx 270.7 + 60 + 170 + 25 = 525.7$ kg

3) Табела „ВЛЕЗ/ИЗЛЕЗ“ (kg)

ВЛЕЗ

Компонента	kg
Руда	1000
Кокс	250
Варовник CaCO ₃	179.8
Воздух (за согорување)	(за поедноставено – нека се пресмета во прашање 4)

ИЗЛЕЗ (главни)

Производ	kg
Топол метал	436.9

Производ	kg
Троска	525.7
CO ₂ од редукција	496.2
CO ₂ од калцинација	79.1
CO ₂ од согорување на 60 kg C	60 kg C $\rightarrow$ (60/12.01)=4.99 kmol $\rightarrow$ 4.99×44.01= 219.7 kg
Вкупно CO ₂ (сумирано)	795.0 kg
N ₂ (од воздух)	(поедноставено – во прашање 4)

Напомена: Во реалност има и CO во врвниот гас, H₂, H₂O, прашина итн. Тука е намерно поедноставено за студентска задача.

4) Поедноставен масен биланс – клучни суми

Метал: 436.9 kg

Троска: 525.7 kg

CO₂: 795.0 kg

(плус N₂ од воздух кога ќе се додаде)

5) Поедноставен енергетски биланс

Чекор 9: Топлина од формирање CO ($2C + O_2 \rightarrow 2CO$,

$\Delta H = -221 \text{ kJ}$)

За 1 mol CO: 110.5 kJ ослободени.

$n(CO)=11.28 \text{ kmol} \Rightarrow Q_{CO} = 11.28 \times 10^3 \times 110.5 = 1.25 \times 10^6 \text{ kJ}$

Чекор 10: Топлина од согорување 60 kg C до CO₂

($C + O_2 \rightarrow CO_2$)

$\Delta H = -394 \text{ kJ/mol}$)

$n(C)=60/12.01=4.99 \text{ kmol}$

$Q_{CO_2} = 4.99 \times 10^3 \times 394 = 1.97 \times 10^6 \text{ kJ}$

Вкупно внесена топлина (поедноставено):

$$Q_{\text{влез}} \approx 1.25 \times 10^6 + 1.97 \times 10^6 = 3.22 \times 10^6 \text{ kJ}$$

Чекор 11: Потрошувачка за калцинација



$$n(\text{CaCO}_3) = 179.8 / 100.09 = 1.80 \text{ kmol}$$

$$Q_{\text{калц}} = 1.80 \times 10^3 \times 178 = 3.20 \times 10^5 \text{ kJ}$$

Чекор 12: „Останато“ (загревање/топење/загуби) – поедноставено

$$Q_{\text{останато}} = Q_{\text{влез}} - Q_{\text{калц}} = 3.22 \times 10^6 - 0.32 \times 10^6 = 2.90 \times 10^6 \text{ kJ}$$

Овој термин ги покрива: загревање на шаржа, топење на метал/троска, загуби преку гасови и сидови (како што е наведено во текстот).

Поглавје 4 Производство на бакар

Бакарот претставува еден од најстарите и најважни метали во човечката историја, чие откривање и употреба го означуваат почетокот на таканаречената „бакарна доба“ во развојот на цивилизацијата. Овој метал, познат по својата извонредна електрична и топлинска спроводливост, како и по висока пластичност и корозивна отпорност, има суштинска улога во современата индустрија, технологија и енергетика. Производството на бакар, од неговите природни минерали до метал со висока чистота, претставува комплексен и технолошки напреден процес кој ги обединува знаењата од металургијата, хемијата, геологијата и инженерството на Материјали.

Во природата, бакарот најчесто се среќава во форма на сулфидни руди (на пример, халкопирит CuFeS_2 , борнит Cu_5FeS_4 и халкозин Cu_2S), поретко како оксиди (куприт Cu_2O , малахит $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) или во самородна состојба. За да се добие метален бакар од овие минерали е потребно да се спроведе низа на физичко-хемиски постапки кои овозможуваат раздвојување на

металната компонента од рудната маса, нејзино прочистување и трансформација во форма погодна за индустриска примена.

Современото производство на бакар се заснова на два основни технолошки пристапа:

1. **Пирометалуршки процеси**, кои се применуваат за сулфидни руди и вклучуваат термички третмани на високи температури (калцинација, пржење, топење и рафинирање), и
2. **Хидрометалуршки процеси**, кои се користат за сиромашни руди и оксидни форми на бакар и подразбираат растворување на рудата со киселини, екстракција и електролитско издвојување на металот.

Пирометалургијата, како традиционален метод, и денес има доминантна примена, особено кај крупните индустриски постројки каде што економичноста и обемот на производството се од големо значење. Овој процес бара сложена техничка опрема — високотемпературни печки, системи за прочистување на гасови, топилници, и електролитски бањи — кои овозможуваат постепено издвојување на бакарот и негово прочистување до степен на 99,99 %.

Процесот на производство започнува со дробење и мелење на рудата, со цел да се зголеми површината на честичките и да се олесни понатамошната обработка. Следува обогатување на рудата преку флотација, при што бакарните минерали се одвојуваат од непожелните силикатни и оксидни компоненти. Добивката од овој процес е концентрат со 20 – 35 % Cu, кој потоа се подложува на калцинација и пржење за отстранување на сулфурот и органските нечистотии.

Во фазата на топење, концентратот се загрева на температури над 1200 °C во присуство на топители како силициум диоксид, при што се добива бакарен Каменец (мешавина од Cu_2S и FeS) и **троска**, која содржи силикатни соединенија на железото и други нечистотии. Каменецот понатаму се подложува на рафинирање во конвертерски печки, при што железото се

оксидаира и се отстранува како троска, а сулфидниот бакар се претвора во суров бакар (блистер бакар) со чистота од околу 98 – 99 %.

За да се постигне највисок степен на чистота, суровиот бакар се подложува на електролитско прочистување, при кое анодите од блистер бакар се раствораат во електролитна бања и бакарот повторно се таложи на катодата во форма на **многу чист бакар** (99,99 % Cu). Овој катоден бакар претставува финален производ што се користи за изработка на електрични кабли, спроводници, цевки, легури (бронза, месинг) и бројни високотехнолошки компоненти.

Покрај класичните методи, современите технолошки достигнувања се насочени кон подобрување на енергетската ефикасност, намалување на емисиите на штетни гасови (SO₂, CO₂) и зголемување на искористеноста на рудата. Се развиваат и интегрирани процеси кои комбинираат пирометалуршки и хидрометалуршки техники за оптимално искористување на различни типови руди и индустриски отпад.

Од еколошки аспект, производството на бакар има големо значење и предизвици. Со примена на најдобри достапни техники (БАТ) се настојува да се минимизира влијанието врз животната средина преку рециклирање на троска, гасови и прашина, и повторна употреба на енергетските извори. Така, пирометалургијата на бакар станува пример за одржлива металургија, која ги обединува техничката ефикасност и заштитата на животната средина.

Производството на бакар денес претставува симбол на технолошкиот напредок и индустриската зрелост на едно општество. Неговото значење се огледа не само во економскиот аспект, туку и во глобалната енергетска трансформација – од традиционални индустрии до модерни технологии како електромобилноста, обновливите извори и дигиталната инфраструктура. Бакарот, како „метал на иднината“, ќе продолжи да има клучна улога во развојот на одржлива, енергетски ефикасна и технолошки напредна цивилизација.

4.1. Пирометалургија на бакар

Пирометалургијата претставува гранка на металургијата која се заснова на употреба на високи температури за да се добие чист метал од неговите руди. Кај бакарот, овој процес е еден од најстарите и најшироко применуваните методи за негово извлекување и прочистување. Основниот принцип на пирометалургијата е редукција на металните соединенија (најчесто оксиди или сулфиди) до метална состојба со примена на топлина и редукциони средства како јаглерод, водород или сулфурни гасови.

Процесот на пирометалургија на бакарот вообичаено се состои од четири основни фази, кои последователно овозможуваат трансформација на рудата во чист метал:

- Калцинација (*Calcination*)

Калцинацијата претставува почетна термичка обработка на рудата, при што таа се загрева на високи температури без присуство на воздух или со ограничена количина на кислород. Целта е да се изврши термичка разложба на нестабилните компоненти во рудата – најчесто карбонати, сулфати или хидрати. При тоа се ослободуваат испарливи соединенија, како што се: јаглерод диоксид (CO_2), сулфур диоксид (SO_2) или вода (H_2O).

На пример, бакарните карбонатни руди како малахит ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$) при калцинација се разложуваат и преминуваат во бакар(II)-оксид (CuO), што овозможува понатамошна редукција во следните фази.

- Пржење (*Roasting*)

Пржењето е металуршки процес при кој рудата или концентратот се изложува на високи температури во присуство на воздух или кислород, со што се активираат реакции помеѓу гасовите и цврстите честички. Целта на пржењето кај бакарните сулфидни руди (како халкопирит – CuFeS_2) е делумна оксидација на сулфидите со цел да се отстрани дел од сулфурот во форма на SO_2 , а истовремено да се формира смеса од бакар(II)-оксид и железо(II)-оксид.

Овој чекор ја подготвува рудата за топење, овозможувајќи полесна сепарација на металната и неметалната фаза.

Реакцијата може да се прикаже поедноставено:

$$2\text{CuFeS}_2 + 4\text{O}_2 \rightarrow \text{Cu}_2\text{S} + 2\text{FeO} + 3\text{SO}_2\uparrow$$

- **Топење (*Smelting*)**

Во фазата на топење, пржената руда се внесува во високотемпературни печки (обично над 1200 °C), каде што се додаваат топители како силициум диоксид (SiO_2) за да се формира троска. При топењето се одвива редукција и спојување на реакциските продукти во две или повеќе течни фази – метална (Каменец) и неметална (троска).

Каменецот најчесто претставува стопена смеса на бакар(I)-сулфид (Cu_2S) и железен сулфид (FeS), со траги од други сулфиди. која подоцна се прочистува, додека троската содржи силикатни соединенија на железото и останати нечистотии.

Хемиски, процесот може да се илустрира со реакцијата:

$$\text{FeO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{FeSiO}_3 \text{ (троска)}$$

- **Прочистување (*Refining*)**

Последната фаза е прочистување или рафинирање на добиениот суров бакар, со цел да се отстранат остатоците од железо, сулфур, никел, злато, сребро и други примеси. Прво се применува пирометалуршко рафинирање, при што суровиот бакар (со чистота околу 98 – 99 %) се претвора во аноден бакар, кој потоа се подложува на електролитско прочистување. Во електролитски бањи, бакарот од анодата се раствора и повторно се таложи на катодата во форма на многу чист бакар (99,99 %), додека благородните метали (злато, сребро, платина) се акумулираат како аноден талог и понатаму се издвојуваат.

Пирометалургијата на бакарот претставува сложен, но ефикасен индустриски процес кој комбинира физичко-хемиски принципи и инженерски технологии за трансформација на минералните суровини во метал со висока чистота. Секоја од четирите фази – калцинација, пржење, топење и рафинирање –

има своја суштинска улога во добивањето на квалитетен бакар кој се користи во електротехниката, енергетиката, машинската индустрија и бројни други сектори.

4.1.1. Руди на бакар

Рудата од бакар во природата најчесто се среќава во комбинација со сулфидни минерали, кои претставуваат основен извор за добивање на овој важен метал. Овие минерали се формираат при магматски и хидротермални процеси во Земјината кора и се јавуваат во различни геолошки средини – од длабоки вулкански подрачја до седиментни наслаги. Сулфидните минерали се особено значајни бидејќи овозможуваат економично издвојување на бакар преку пирометалуршки процеси на високи температури.

Најважниот и најраспространет минерал кој служи како главен извор на бакар е халкопиритот (CuFeS_2). Тој е составен од бакар, железо и сулфур и се проценува дека претставува приближно половина од вкупното светско производство на бакар (околу 50 %). Халкопиритот е минерал со карактеристична златножолта боја и метален сјај, што често го прави визуелно сличен на пиритот („лажно злато“). Сепак, за разлика од пиритот, халкопиритот е значително побогат со бакар и може да се обработува со пирометалуршки методи како пржење, топење и рафинирање.

Покрај халкопиритот, постојат и други важни бакарни минерали кои имаат голема економска вредност, иако се поретки или се користат во специфични индустриски услови. Меѓу нив спаѓаат:

- **Халкозит (Cu_2S)** – едноставен сулфиден минерал со висока содржина на бакар, кој често се јавува во зоните на оксидација на халкопиритните наоѓалишта. Поради високата концентрација на метал, халкозитот се смета за руда со висока технолошка вредност.



Слика 4.1. Халкозит

- **Малахит ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$)** – карбонатен минерал со карактеристична зелена боја и лентичеста структура. Тој се формира во површинските делови на рудните тела под дејство на атмосферски води и се користи како декоративен камен, но и како суровина за хидрометалуршко издвојување бакар.



Слика 4.2. Малахит

- **Азурит ($2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$)** – сино обоен минерал со кристална структура, кој најчесто се јавува заедно со малахитот. Иако е поредок, азуритот има слични својства и служи како важен индикатор за присуство на бакар во геолошките слоеви.

-



Слика 4.3. Азурит ($2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$)

- **Борнит** — познат и како „пурпурен бакарен руден минерал“, овој сулфид на бакар и железо има виолетова боја и висока содржина на бакар (приближно 55 %). Тој често се јавува во комбинација со халкопирит и халкозит, а поради својот сјај и боја е препознатлив и на прв поглед.



Слика 4.4. Борнит ($3\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Fe}_2\text{S}_3$)

- **Ковелин** – темносин до црн сулфиден минерал кој се јавува во горните делови на рудните тела како секундарен продукт од оксидација на други бакарни сулфиди.



Слика 4.5. Ковелин (CuS)

Иако неговата концентрација на бакар е помала во споредба со халкозитот, ковелинот има голема улога во природните трансформации на бакарните минерали.

Во практиката, економската вредност на бакарните руди зависи од нивната содржина на метал и од можноста за нивна преработка. Сулфидните руди, како што се халкопирит, борнит и халкозит, претставуваат основна суровина за пиromеталуршко производство, бидејќи нивниот состав овозможува релативно лесно раздвојување на металот од сулфурните и железните компоненти при високи температури. Од друга страна, карбонатните и хидратните минерали како малахит и азурит се погодни за хидрометалуршки процеси, кои вклучуваат растворување со киселини и електролитско таложење.

Овие разновидни минерални форми на бакар се распоредени во бројни светски рудници, меѓу кои најпознати се наоѓалиштата во Чиле (Ескуел и ЧукикаКаменеца), САД (Аризона), Замбија, Конго и Австралија. Благодарение на богатата геолошка распределба и технолошката достапност на рудите, бакарот и денес останува еден од најстратегиските индустриски метали, кој има клучна улога во електрониката, енергетиката, градежништвото и производството на легури.

4.1.2. Концентрација на бакарна руда

Процесот на концентрација на бакарната руда претставува прв и суштински чекор во производството на метален бакар. Суровата руда која се вади од рудникот содржи релативно мала количина на бакар — обично само околу 0,5 – 1 % Cu, односно просечно 0,7 % бакар. Останатиот дел од рудата се состои од непотребни минерали, камени Материјали и други примеси (кварц, железни оксиди, алуминиум оксиди итн.). Поради тоа, пред понатамошна обработка е потребно бакарните минерали да се обогатат, односно да се концентрира нивната содржина преку физичко-хемиски процеси.

За оваа цел најчесто се применува постапката на флотација со пена (*froth flotation process*) – една од најважните техники во современата минерална обработка. Целта на овој процес е да се раздвојат бакарните минерали од непожелните честички, користејќи го нивното различно однесување во присуство на вода, воздух и органски реагенси.

Во практиката, рудата прво се дроби и се меле до многу ситни честички, со цел да се зголеми нејзината површина за реакција. Потоа, таа се претвора во суспензија (*slurry*) — мешавина од фино дробена руда и вода. Оваа суспензија се пренесува во флотационен резервоар, каде се додаваат неколку специфични реагенси кои овозможуваат формирање стабилна пена и селективно прикачување на бакарните минерали на воздушните меурчиња.

4.1.2.1. Механизам на флотацијата

Кога воздухот се вдувува во флотационата бања, на површината се создава пена составена од воздушни меурчиња со прилепени бакарни минерали. Оваа пена се собира од горниот дел на садот и се одвојува како флотационен концентрат, кој содржи 20 – 35 % бакар. Остатокот од суспензијата, кој не содржи метал (т.н. отпаден песок или *tailings*), се исфрла или понатаму се обработува за рециклирање.

Концентратот добиен на овој начин се подложува на следните металуршки фази — калцинација, пржење, топење и рафинирање, со цел да се добие чист бакар. Флотацијата, како ефикасен и економичен метод, овозможува дури и сиромашните руди со мала содржина на бакар да се обработуваат и да се искористат индустриски.

Благодарение на својата едноставност, приспособливост и висока ефикасност, флотацијата со пена останува најважниот индустриски метод за збогатување на бакарните руди во светот. Таа е применлива не само за халкопирит, туку и за други сулфидни минерали како борнит, ковелин и халкозит, овозможувајќи одржливо и рационално искористување на рудните ресурси.

4.1.2.2. Хемиски реагенси во флотациониот процес

1. Варовна вода (Ca(OH)_2) — се додава за одржување на алкална рН вредност во системот, обично околу рН 9 – 10. Основната средина спречува оксидација на бакарните минерали и ја стабилизира пената. Исто така, варовната вода го намалува присуството на железни и сулфидни нечистотии.
2. Борово масло (*Pine oil*) — служи како пенообразувач (*frothing agent*). При мешање на суспензијата со воздух, боровото масло овозможува формирање ситни меурчиња кои ја носат бакарната руда на површината на растворот во форма на пена. Бакарните минерали, кои имаат хидрофобна природа, се прилепуваат за меурчињата, додека отпадните минерали (хидрофилни) остануваат во растворот.
3. Алкохол (најчесто етил или амил алкохол) — се додава за зголемување на стабилноста на меурчињата и за подобра селективност во процесот на флотација. Алкохолот ја намалува површинската напнатост на водата, овозможувајќи меурчињата да траат подолго време и да

носат поголема количина на бакарен минерал кон површината.

4. Хемиски колектор (*Chemical collector*) – ова е органско соединение (често ксантат, на пример, натриум етил ксантат, $\text{NaC}_2\text{H}_5\text{OCS}_2$), кое го зголемува афинитетот на бакарните минерали кон воздухот. КOLEKTOPOT се апсорбира на површината на бакарните честички и ги прави хидрофобни, овозможувајќи им полесно да се врзат со воздушните меурчиња.

Во процесот на флотација на бакарните руди, клучна улога имаат хемиските колектори — супстанции кои овозможуваат селективно прикачување на минералните честички на воздушните меурчиња. Тие се органски соединенија кои се адсорбираат на површината на бакарните минерали, менувајќи ја нивната хемиска природа и создавајќи хидрофобен слој (водоотпорна површина). На овој начин, бакарните минерали се одвојуваат од другите хидрофилни (водољубиви) Материјали во рудата.

Најчесто користени колектори се ксантатите (*xanthates*), кои се соли и естри на ксантинската киселина. Тие имаат општата формула $\text{R-OCS}_2\text{M}$, каде што R претставува алкилна или арилна група, а M е метален јон (обично Na^+ или K^+). Ксантатите имаат способност да се врзуваат за металните јони на површината на минералите (на пример, Cu^{2+} , Fe^{2+} , Pb^{2+}), формирајќи слабо растворливи метал-ксантатни комплекси. Овие комплекси се хидрофобни и овозможуваат минералните зрнца да се прилепат за воздушните меурчиња што се формираат при флотацијата.

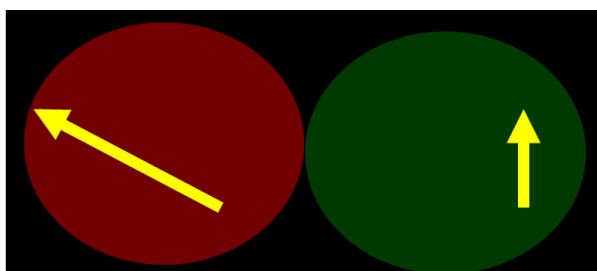
Освен ксантатите, во индустриската практика се користат и други групи на колектори:

- Дитиофосфати (*dithiophosphates*) – соединенија со сулфурна група кои имаат сличен механизам на дејство како ксантатите, но покажуваат поголема селективност кон одредени минерали, особено во присуство на сложени руди. Тие овозможуваат подобра флотација на бакар, олово

и благородни метали во случаи кога во рудата има повеќе метални компоненти.

- ТиокарбаКаменеци (*thionocarbamates*) – современи органосулфурни реагенси кои се користат заfino приспособување на хидрофобноста на површината на минералите. Тие обезбедуваат стабилна флотација дури и при пониски концентрации и имаат поголема отпорност на оксидација, што ги прави многу ефикасни во современите флотациони постројки.

•



Potassium
amyl xanthate

а

б

Слика 4.6. а. Хидрофобни – привлечени од јаглеводородно масло од бор, и б. Хидрофилни – привлечени од сулфидни минерали

Благодарение на овие реагенси, површината на бакарните минерали станува хидрофобна, односно не се меша со водата. Тоа овозможува минералите да се прилепат на воздушните меурчиња и да се подигнат на површината во форма на пена, од која потоа се собира флотациониот концентрат богат со бакар.

Зголемувањето на рН вредноста во флотациониот процес има значително влијание врз површинските својства на минералите и селективноста на нивното одвојување. Кога во системот се додава варовна вода или друг алкален реагенс, се создава базна средина, која предизвикува јонизација на поларните краевина молекулите на колекторите (на пример, ксантати или дитиофосфати).

Како резултат на оваа јонизација, реагенсите почнуваат селективно да се врзуваат со одредени минерали, во случајот со

халкопиритот (CuFeS_2), додека пиритот (FeS_2) останува непогоден за адсорпција. Оваа појава е од суштинско значење затоа што халкопиритот е главниот минерал кој содржи бакар, а пиритот претставува непожелна примеса. На тој начин, контролата на рН овозможува селекција на бакарните минерали од железните сулфиди, што директно ја зголемува чистотата на конечниот концентрат.

4.1.2.3. Процесот на формирање пена и одвојување

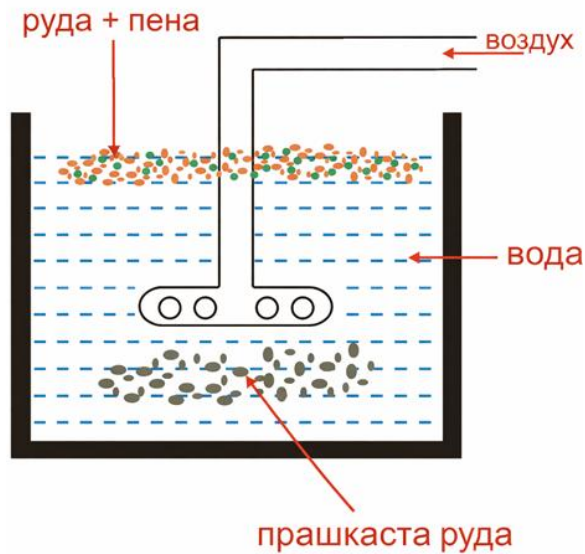
По регулирањето на рН вредноста, во флотационата суспензија се вдувува воздух преку специјални цевки или мешалки. Ова создава голем број ситни воздушни меурчиња кои се движат нагоре низ течноста.

Фино дисперзираните хидрофобни честички на рудата, кои се обработени со хемиски колектори, се прикачуваат на површината на воздушните меурчиња. Овој контакт помеѓу минералните зрнца и меурчињата се одвива благодарение на хидрофобниот карактер на бакарните минерали, кои „бегаат“ од водата и се врзуваат за воздухот.

Како што меурчињата се издигнуваат, тие ја носат рудата со себе и на површината се создава слој од пена (*froth*), составен од воздушни меурчиња обложени со бакарни минерали. Овој слој претставува флотационен концентрат, слика 4.7 и 4.8.

Флотационата пена, богата со бакар, се собира механички од површината на резервоарот со помош на стругалки или преку прелевање. Потоа, концентратот се исушува и повторно се обработува (*reprocessed*) со цел да се добие поголема чистота и да се подготви Материјалот за понатамошни металуршки фази, како што се: калцинација, пржење и топење.

Овој метод на флотација овозможува висока ефикасност на одвојување, бидејќи се користи природната разлика во хемиското однесување на различните минерали во зависност од рН, електричниот потенцијал и поларноста на нивните површини.



Слика 4.7. Формирање пена во процес на флотација



Слика 4.8. Пена од процес на флотација

4.1.2.4. Отстранување и повторна обработка на пена

Појаснување:

- **Зголемување на pH** → ја зголемува јонизацијата на колекторите → тие подобро се прикачуваат на бакарниот минерал (CuFeS_2).

- **Пиритот (FeS_2)** останува во растворот бидејќи не се врзува со колекторите.
- **Воздухот** создава меурчиња кои ги носат хидрофобните честички кон површината.
- **Пената** што се формира содржи збогатен бакар и се одвојува како концентрат.

4.1.2.5. Одвојување и управување со остатокот

Покрај концентратот, во процесот на флотација се создава и остаточен Материјал (*tailings*), кој се состои од песочни честички, глина и други непожелни примеси. Овие Материјали немаат значајна содржина на бакар и затоа се таложат на дното на флотациониот сад.

Во зависност од составот, овој отпаден Материјал може да се:

- отфрли на контролирани депонии, со соодветна заштита од загадување, или
- преработи повторно (*reprocessed*) со цел да се извлечат други корисни елементи, како што се железо, молибден, злато, сребро или ретки минерали кои можат да се наоѓаат во траги во рудата.

Современите металуршки постројки настојуваат да го минимизираат отпадот и да ја зголемат ефикасноста на користење на суровините преку циркуларна обработка. Така, отпадниот Материјал се анализира, а корисните компоненти се издвојуваат со дополнителни процеси како хидрометалургија, биолошка екстракција или магнетна сепарација.

4.1.3. Еколошки и економски аспект

Еден од главните предизвици на флотацијата е управувањето со отпадната суспензија која содржи остатоци од реагенси и минерални честички. Во современите системи, овие отпадни води се рециклираат, а цврстите остатоци се стабилизираат и се складираат на еколошки безбеден начин. На

тој начин, производството на бакар се усогласува со принципите на одржлива металургија, каде што се намалува загадувањето и се зголемува степенот на искористување на рудата.

Со други зборови, флотациониот процес не само што овозможува збогатување на бакарот до 28 – 35 % Cu, туку истовремено создава основа за рационално управување со минералните ресурси, каде секој составен дел од рудата наоѓа своја технолошка и економска примена.

4.1.4. Пржење

Пржењето претставува една од најважните фази во пирометалуршката обработка на сулфидни руди на бакар. Овој процес се одвива по завршувањето на флотацијата, кога бакарниот концентрат веќе е збогатен и содржи меѓу 20 и 35 % бакар, најчесто во форма на бакарни и железни сулфиди (CuFeS_2 , Cu_2S , FeS_2).

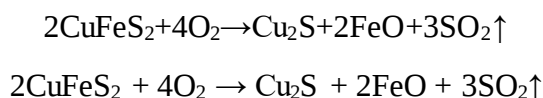
Целта на пржењето е да се измени хемискиот состав на концентратот преку делумна оксидација на неговите компоненти, со што се овозможува поефикасно и економично топење во следната фаза од производството.

Процесот се изведува во печење со присуство на воздух или кислород, при температури помеѓу 500 °C и 900 °C, зависно од составот на рудата и бараниот степен на оксидација. При тоа, дел од сулфурот се претвора во гасовит сулфур диоксид (SO_2), кој се одведува и понатаму може да се користи за производство на сулфурна киселина (H_2SO_4).

4.1.4.1. Главни цели на процесот на пржење

1) Отстранување на дел од сулфурот

Главната цел на пржењето е да се намали содржината на сулфур во концентратот. Сулфурот при високи температури реагира со кислородот од воздухот, создавајќи сулфур диоксид според реакцијата:



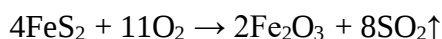
Со оваа реакција дел од сулфидите се оксидираат, а сулфурот се отстранува како гас. Намалувањето на содржината на сулфур е неопходно, бидејќи при понатамошно топење сулфурните гасови би предизвикале големи загуби на метал и загадување на воздухот.

2) Претворање на железните сулфиди во железни оксиди и сулфати

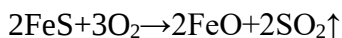
Втората цел е трансформација на железните сулфиди (FeS , FeS_2) во железни оксиди (FeO , Fe_2O_3) и железни сулфати (FeSO_4).

Овие соединенија подоцна лесно се комбинираат со силициум диоксидот (SiO_2) што се додава како топител (топител) во фазата на топење, формирајќи железна троска (FeSiO_3). Оваа троска лесно се одвојува од бакарниот Каменец и овозможува поефикасно прочистување на металната фаза.

Хемиски, процесот може да се прикаже со следните реакции:



или



Овие оксидни продукти имаат клучна улога во понатамошната металуршка трансформација, бидејќи железото се врзува во троската, а бакарот останува во металната фаза.

3) Предзагревање на концентратот за намалување на енергетската потрошувачка при топење.

Третата цел е предзагревање на концентратот, со што се намалува количината на топлинска енергија што ќе биде потребна во печката за топење.

Во индустриските услови, овој чекор е од особено значење, бидејќи топењето е една од најенергетски интензивните операции во металургијата. Со делумно пржење, Материјалот се доведува до повисока температура и во исто време се елиминираат испарливите компоненти (сулфур, влага, јаглеродни соединенија).

Ова ја подобрува реактивноста на концентратот и овозможува побрзо и порамномерно топење, што ја зголемува вкупната ефикасност на процесот.

4.1.5. Типови на печки и технолошки аспекти

Пржењето може да се изведува во различни типови на печки:

- Реверберациони печки,
- Печки со флуидизиран слој (*fluidized-bed roasters*),
- Печки со повеќе нивоа (*multiple-hearth roasters*).

Во современата практика, најчесто се користи флуидизираната печка, бидејќи обезбедува одличен контакт меѓу честичките и кислородот, рамномерно загревање, и можност за континуирано работење.

Пржењето на бакарниот концентрат е критична подготвителна фаза која овозможува:

- ефективно отстранување на сулфурот,
- оксидација на железото и подготвување за шлакување,
- предзагревање на Материјалот и намалување на енергетските трошоци во топењето.

Со правилно изведен процес, се добива реактивен концентрат кој лесно се топи и претставува основа за добивање чист бакарен Каменец ($\text{Cu}_2\text{S} + \text{FeS}$) во наредната металуршка фаза.

4.1.6. Топење (*Smelting*)

Топењето претставува централна фаза во пирометалургијата на бакарот, при која претходно пржениот концентрат се подложува на високи температури за да се добијат две стопени фази – метална и неметална. Овој процес има за цел да изврши делумна редукција и раздвојување на бакарните сулфиди од железните и силикатните соединенија, со што се

создава јасна физичка и хемиска поделба меѓу посакуваниот метал и отпадните примеси.

Во суштина, топењето се состои од загревање на пржениот концентрат на висока температура (околу 1200 °C) во присуство на топител – топител, најчесто силициум диоксид (SiO₂). Топителот има задача да ја намали вискозноста на стопената маса и да ја направи троската (троската) поподвижна, со што се овозможува полесно одвојување на фази и исцедување на нечистотиите.

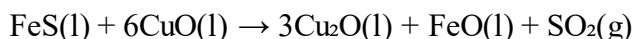
4.1.6.1. Редукција на бакарните оксиди

Во процесот на топење на бакарниот концентрат, една од најважните хемиски реакции е редукцијата на бакарните оксиди (CuO и Cu₂O) кои се формираат во претходната фаза на пржење. Целта на оваа редукција е повторно да се претворат овие оксиди во бакарни сулфиди (Cu₂S), со што се обезбедува нивно преминување во сулфидната метална фаза – Каменец (каменец).

Оваа реакција е од суштинско значење, бидејќи бакарот во форма на оксид е хемиски неактивен и би останал во троската (неметалната фаза), со што би се изгубил дел од металот. Затоа, со редукцијата бакарот повторно се врзува со сулфурот, формирајќи соединенија на Cu₂S, кои имаат метален карактер и се растворливи во стопениот Каменец.

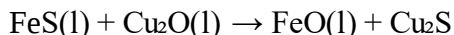
Главни реакции на редукција:

- Редукција на бакар(II)-оксид (CuO):



Во оваа реакција железниот сулфид (FeS) служи како редуцирачко средство, кое го редуцира бакарниот оксид до бакар(I)-оксид (Cu₂O), при што се ослободува сулфур диоксид (SO₂). Во исто време, железото се оксидира до железен оксид (FeO).

- Редукција на бакар(I)-оксид (Cu₂O) во бакарен сулфид (Cu₂S):



Оваа реакција е клучна за формирање на бакарниот сулфид (Cu_2S), кој е главната метална компонента на Каменецот. Со оваа трансформација, бакарот се преместува од оксидна во сулфидна форма, што овозможува негово собирање во металната фаза при топење.

4.1.6.2. Формирање на Каменец (каменец)



Оваа реакција ја претставува финалната комбинација на бакарниот и железниот сулфид, при што се добива Каменец (каменец) – стопена сулфидна смеса која се таложи на дното на печката. Каменецот претставува главен носител на бакарот, кој понатаму ќе се прочистува во конвертерски печки.

Во оваа фаза, бакарниот концентрат веќе е делумно оксидиран од претходното пржење. Ако бакарните оксиди би останале во оваа форма, тие би се задржале во триската (која е силикатна и оксидна по природа) и би се изгубиле.

Со додавање на железен сулфид (FeS), се активира внатрешна редукција во системот, при што бакарните оксиди се претвораат во сулфиди. Сулфидите се погусто и потешко топени соединенија, кои се одвојуваат од триската и формираат метална фаза (Каменец). Овој процес овозможува речиси целосно искористување на бакарот од концентратот и ја зголемува неговата концентрација во стопената смеса.

- Главната реакција во топењето е редукција на бакарните оксиди во бакарни сулфиди.
- FeS дејствува како редуцирачко средство, а SO_2 се ослободува како гас.
- Се формира Каменец ($\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{FeS}$) – метална фаза која содржи повеќе од 50 % бакар.

- Со ова се обезбедува миграција на бакарот во металната стопена фаза, а нејзиното раздвојување од троската е лесно поради разликата во густината и хемискиот состав.

4.1.7. Фази формирани при топењето

При топењето на бакарниот концентрат се добиваат две основни степени фази:

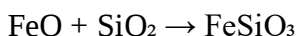
1) Сулфидна фаза – „Каменец“ (*matte*, каменец)

Оваа фаза е потешка и се таложи на дното на печката. Таа претставува мешавина од железни и бакарни сулфиди (Cu_2S и FeS) и служи како главен носител на бакарот во понатамошните процеси.

Каменецот обично содржи од 35 до 60 % бакар, во зависност од степенот на редукција и составот на рудата. Оваа метална фаза подоцна се подложува на понатамошна оксидација во конвертерски печки, каде што железото и сулфурот се отстрануваат, а бакарот се добива во полупрочистена форма (т.н. blister copper).

2) Оксидна фаза – троска (*slag*)

Втората фаза е полесна и се собира над каменецот. Таа се состои главно од железни оксиди, силикатни соединенија и други нечистотии, кои се нерастворливи во Каменецот. Овие соединенија се резултат на реакцијата меѓу железните оксиди (FeO , Fe_2O_3) и силициум диоксидот (SiO_2) кој е додаден како топител:



Овој железен силикат претставува троска, која ја изолира металната фаза и овозможува одвојување на несаканите компоненти од бакарниот концентрат.

4.1.8. Технолошки услови на процесот

Процесот на топење се изведува во реверберациони печки, печки со флуидизиран слој или електрични печки, зависно од видот на концентратот и капацитетот на постројката.

Температурата обично се движи околу 1200 – 1300 °C, што е доволно за целосно стопување и разделување на фазите.

- *Главни реакции*

Во процесот се додава SiO_2 како топител, со цел да се формира троска со пониска точка на топење и поголема флуидност, што овозможува подобро механичко и хемиско одвојување на нечистотиите.

Како резултат, се создаваат две јасно одвоени зони во печката:

- Долна зона (Каменец) – потешката сулфидна фаза богата со бакар,
- Горна зона (троска) – полесна оксидна фаза со железни и силикатни соединенија.

4.1.8.1. Одвојување на фазите и третман на троската

Кога стопените фази се стабилизираат, троската плови на површината на металниот Каменец поради нејзината помала густина. Потоа се исцедува (*tapped off*) преку посебен отвор на печката и се отстранува или понатаму се обработува, доколку содржи корисни метали.

Каменецот, пак, се собира на дното и се пренесува во конвертерска печка, каде што се врши понатамошна оксидација со кислород за отстранување на железото и сулфурот. На крај се добива суров бакар (*blister copper*) со чистота од околу 98 – 99 % Cu.

Процесот на топење има суштинска улога во металургијата на бакарот, бидејќи овозможува:

- физичко раздвојување на металните и неметалните компоненти,
- формирање концентриран бакарен Каменец,
- ефикасно отстранување на железните и силикатните нечистотии преку троската,

- и намалување на енергетската потрошувачка преку употреба на топителни и оптимални температури.

Во суштина, оваа фаза претставува преод меѓу хемиското пржење и металното прочистување, подготвувајќи ја рудата за финалното добивање чист бакар.

4.1.9. Конвертирање

По завршувањето на фазата на топење, се добива Каменец (каменец) – стопена сулфидна смеса составена претежно од бакарен сулфид (Cu_2S) и железен сулфид (FeS). Содржината на бакар во овој каменец обично се движи помеѓу 30 и 80 %, зависно од квалитетот на рудата, степенот на пржење и условите при топење.

Овој полупроизвод претставува основна суровина за следната металуршка фаза – конверзија, која има за цел да го трансформира бакарниот сулфид во метален бакар, додека сулфурот и железото се елиминираат од смесата.

Целта на конверзијата е отстранување на сулфурот и железото од каменецот преку контролирана оксидација со кислород (O_2). При тоа, сулфурот се претвора во сулфур диоксид (SO_2) – гас кој се одведува и често се користи за производство на сулфурна киселина, а бакарот останува во метална форма (Cu).

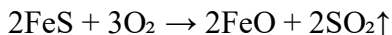
Процесот се одвива во конвертерски печки (на пр., *Peirce-Smith конвертер*), во кои се вдувува кислород низ стопената маса. Контролата на температурата и составот е клучна за да се овозможи селективна оксидација – прво на железото, а потоа на сулфурот, без да се оксидира самиот бакар.

4.1.9.1. Фази на конверзијата

Процесот се изведува во две последователни фази:

1) Фаза на отстранување на железото

Во оваа фаза целта е да се оксидира железниот сулфид (FeS) во железен оксид (FeO). Реакцијата се одвива според следната равенка:



Создадениот железен оксид (FeO) се комбинира со силициум диоксидот (SiO₂) кој се додава како топител, при што се формира железна троска (FeSiO₃):

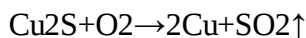


Оваа троска се одвојува од металната маса и се отстранува преку посебен излезен канал. Со ова се отстранува најголемиот дел од железото од системот, подготвувајќи ја смесата за следната, финална фаза.

2) Фаза на добивање бакар

Откако железото е елиминирано, започнува втората фаза – оксидација на бакарниот сулфид (Cu₂S) за да се добие метален бакар.

Реакцијата се одвива на следниот начин:



Во оваа реакција сулфурот повторно се оксидира во сулфур диоксид, а бакарот се издвојува во чиста метална форма. Металниот бакар кој се добива во оваа фаза се нарекува **суров** или блистер бакар (*blister copper*), бидејќи при ладење неговата површина има порозен изглед поради излегувањето на гасниот SO₂.

Овој бакар има чистота од 98 до 99 %, и претставува полупрочистен метал кој потоа се подложува на електролитско рафинирање за добивање бакар со чистота од 99,99 %.

4.1.9.2. Технолошки и еколошки аспекти

Процесот на конверзија се изведува при температури од околу 1200 – 1250 °C. Поради интензивното создавање на SO₂, модерните постројки користат затворени системи со уреди за собирање и обработка на гасовите, кои потоа се користат за производство на H₂SO₄, што го прави процесот еколошки поодржлив.

Конверзијата претставува клучна фаза во пирометалургијата на бакарот, во која се постигнува:

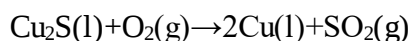
- трансформација на сулфидната смеса во метален бакар,
- отстранување на железото и сулфурот преку селективна оксидација,
- и создавање висококвалитетен суров бакар (*blister copper*), подготвен за финално електролитско прочистување.

Со овој процес, бакарот преминува од хемиски врзана форма (сулфид) во чиста метална состојба, што претставува суштински чекор во неговото индустриско производство.

4.1.10. Добивање бакар и електролитско прочистување

Во последната фаза на пирометалуршката обработка, бакарниот сулфид (Cu_2S) кој се содржи во Каменецот (каменецот), се оксидира во присуство на кислород со цел да се добие чист метален бакар (Cu).

Хемиската реакција што ја опишува оваа трансформација е следна:



Во оваа реакција, бакарниот сулфид реагира со кислородот, при што сулфурот се претвора во сулфур диоксид (SO_2), а бакарот се ослободува во стопена метална форма. На крајот од процесот се добива суров или *blister* бакар, кој има чистота од приближно 98,5 %.

Називот *blister copper* потекнува од порозниот изглед на неговата површина, кој се јавува поради излегувањето на SO_2 гасот при ладењето на стопениот метал. Овој суров бакар претставува полупрочистен метал, кој мора дополнително да се прочисти за да достигне индустриска чистота (99,9 % Cu) – што се постигнува со процесот на електролитско рафинирање.

4.1.11. Прочистување на бакарот (*Refining*)

Поголемиот дел од индустрискиот бакар (повеќе од 99 %) се прочистува преку електролиза – процес што овозможува

добивање многу чист метален бакар (99,99 % Cu), погоден за употреба во електрични спроводници, кабли, електроника и високотехнолошка опрема.

4.1.11.1. Принцип на електролитско прочистување

Електролитското прочистување (електрорафинација) претставува електрохемиски процес со кој суровиот бакар (blister copper) се прочистува до ултрависока чистота (99,99 % Cu). Процесот се изведува во електролитска бања што содржи воден раствор на бакар(II)-сулфат (CuSO_4) и сулфурна киселина (H_2SO_4).

Основата на процесот е селективно растворање и повторно таложување на бакарот, врз основа на неговиот стандарден електроден потенцијал, кој е поволен во однос на повеќето примеси.

Состав на електролитската ќелија

1. Анода (позитивна електрода)

Анодата е изработена од излиен суров бакар (blister copper) со чистота од околу 98–99 %. Таа содржи различни примеси:

- пореактивни метали: **Fe, Zn, Ni**
- благородни метали: **Ag, Au, Pt**
- други примеси: **Pb, As, Sb**

Анодата служи како извор на бакар, кој при електролизата се раствора во електролитот.

2. Катода (негативна електрода)

Катодите се тенки плочи од чист бакар или од не'рѓосувачки челик, на кои се таложи прочистениот бакар во метална форма.

3. Електролит

Електролитот е кисел воден раствор од:

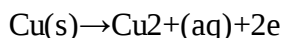
- CuSO_4 – обезбедува Cu^{2+} јони
- H_2SO_4 – ја зголемува електричната спроводливост и стабилноста на растворот

➤ Електрохемиски реакции

Кога низ системот се пропушта постојана електрична струја (DC), се одвиваат две поврзани редокс реакции:

1. Реакција на анодата – оксидација

На анодата, металниот бакар се оксидира, односно се раствора во електролитот:

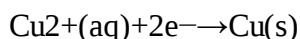


Со оваа реакција:

- бакарот преминува во јонска форма (Cu^{2+}),
- електроните се ослободуваат и течат низ надворешното електрично коло.

2. Реакција на катодата – редукција

На катодата, бакарните јони од растворот се редуцираат и се таложат како чист метал:



На овој начин, бакарот се пренесува:

од анодата → преку електролитот → до катодата,
при што се добива бакар со многу висока чистота.

❖ Однесување на примесите

- Пореактивни метали (Fe, Zn, Ni)

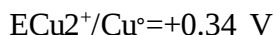
Иако се раствораат на анодата, тие не се таложат на катодата, бидејќи нивниот редукциски потенцијал е понегативен од оној на бакарот. Тие остануваат во растворот.

- Благородни метали (Ag, Au, Pt)

Тие не се оксидираат на анодата и паѓаат на дното на ќелијата како аноден талог (sludge), кој е економски вреден.

- Значење на електродниот потенцијал

Стандардниот редукциски потенцијал на бакарот е:

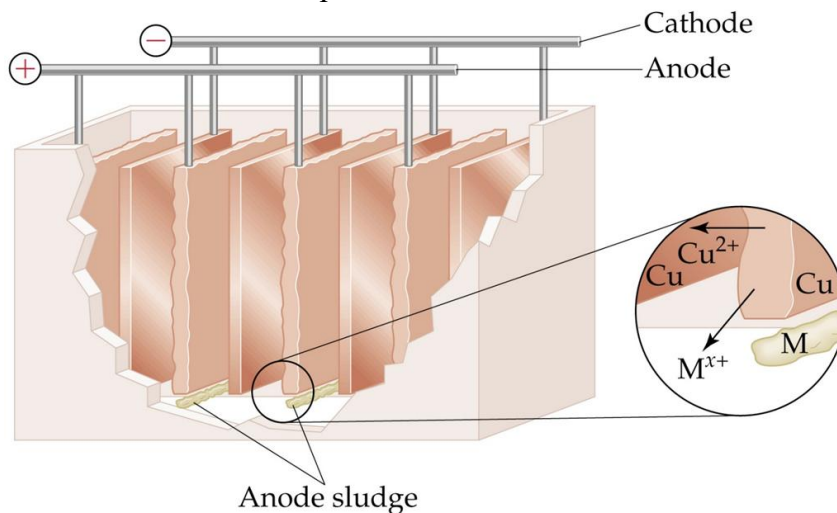


Оваа вредност овозможува:

- бакарот лесно да се редуцира на катодата,
- селективно одвојување од повеќето примеси,
- добивање метал со 99,99 % чистота.

Електролитското прочистување на бакарот претставува најпрецизниот и најсигурниот метод за добивање високочист метален бакар. Процесот ја користи разликата во електрохемиските својства на металите, овозможувајќи:

- целосно прочистување на бакарот,
- издвојување на вредни благородни метали,
- висока енергетска и материјална ефикасност.
- Бакарот од анодата се раствора во електролитот во форма на Cu^{2+} јони, кои потоа **се таложат на катодата** како чист метален бакар.



Слика 4.9. Електрохемиско рафинирање на бакар

4.1.11.2. Отстранување на примесите

Во процесот на електролиза примесите се одвојуваат селективно, во зависност од нивната електрохемиска активност:

- Пореактивни (попозитивни) метали од бакарот – како железо (Fe), цинк (Zn) и никел (Ni) – се оксидираат на анодата, но не се таложат на катодата, бидејќи нивните редукциски потенцијали се повисоки. Тие остануваат во растворот како јони.

Помалку реактивни (поблагородни) метали – како сребро (Ag), злато (Au) и платина (Pt) – не се оксидираат и затоа паѓаат на дното на ќелијата како аноден талог (sludge, мил). Овој талог е економски важен, бидејќи содржи благородни метали кои дополнително се издвојуваат и се рециклираат.

На овој начин, од секој тон суров бакар може да се издвојат неколку килограми сребро, злато и платина, што претставува значителен дополнителен економски ефект.

4.1.11.3. Краен производ и квалитет

По неколкунеделна електролиза, на катодите се добива чист бакар со чистота од 99,99 %, кој потоа се топи и се обликува во плочи, жици, цевки и други индустриски производи.

Процесот на електролитско прочистување овозможува не само висока чистота на металот, туку и целосно искористување на суровините, бидејќи сите елементи – и метални и неметални – се рециклираат во некоја форма.

Фазата на добивање и прочистување на бакарот го обединува пирометалуршкиот и електрохемискиот пристап во една целина.

- Преку оксидација на Cu_2S се добива суров бакар (*blister copper*).
- Преку електролиза се добива ултрачист бакар (99,99 %), кој е неопходен за технички и електронски апликации.

Овој комбиниран процес е еден од најсовершените примери на современа металургија, кој комбинира висока енергетска ефикасност, еколошка прифатливост и економска оправданост.

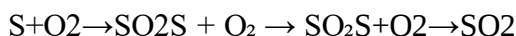
4.1.12. Еколошко влијание (*Environmental Impact*)

Производството на бакар, како и повеќето пирометалуршки процеси, има значително еколошко влијание поради голема количина на гасови, прашина и отпадни води кои се создаваат во различните технолошки фази – од пржење и топење до конверзија и електролитско прочистување. Без соодветни мерки за заштита, овие емисии можат да доведат до загадување на воздухот, водата и почвата, со долгорочни последици врз здравјето на луѓето, биодиверзитетот и квалитетот на животната средина.

4.1.12.1. Загадување на воздухот

а) Емисии на гас

Во текот на процесите на пржење, топење и конверзија, се создаваат големи количини на сулфур диоксид (SO_2) – гас кој претставува еден од главните загадувачи на атмосферата. Хемискиот процес може да се прикаже со реакцијата:



Овој гас, кога се испушта во атмосферата, реагира со водената пареа и формира сулфурна киселина (H_2SO_4), што доведува до појава на кисели дождови.

Киселиот дожд има сериозни последици:

- оштетување на вегетацијата и шумските екосистеми,
- ерозија на градежни Материјали и културни споменици,
- закиселување на почвите и водните тела, што го нарушува биолошкиот баланс.

Затоа, современите металуршки постројки се опремени со системи за собирање и прочистување на гасови, каде што SO_2 се претвора во сулфурна киселина, која се користи како индустриски производ, наместо да се испушта во атмосферата.

б) Прашина и аеросоли

Освен гасови, при дробење, флотација, топење и транспорт на концентратите се создава метална прашина, која содржи

честички на тешки метали како жива (Hg), олово (Pb), кадмиум (Cd) и цинк (Zn).

Овие микрочестички се лесно преносливи преку воздухот и можат да предизвикаат сериозни здравствени проблеми:

- оштетување на нервниот систем,
- болести на белите дробови,
- нарушувања во функцијата на бубрезите и црниот дроб.

Контрола на прашината се постигнува со филтри со висока ефикасност (на пр., електростатички филтри, текстилни филтри) и со затворени транспортни системи за руда и концентрат.

4.1.12.2. Загадување на водите

Металуршките процеси создаваат значителни количини на отпадни води, кои можат да бидат загадени со нерастворливи и растворливи супстанции.

а) Нерастворливи Каменеции

Овие се состојат главно од отпадна кал (sludge) и фино мелена карпа, која се формира при флотацијата и механичката подготовка на рудата. Иако нерастворливите Каменеции се релативно инертни, тие можат да ја зголемат загаденоста на реките и езерата, да го намалат нивото на кислород во водата и да предизвикаат механичко задушување на водните организми.

б) Растворливи Каменеции

Отпадните води често содржат тешки метали (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+}), сулфати (SO_4^{2-}) и флотациони реагенси (борово масло, ксантати, дитиофосфати).

Овие соединенија можат да доведат до:

- токсичност на водните екосистеми,
- биоаккумуляција на метали во рибите и растенијата,
- загадување на подземните води кои служат за пиење.

Современите постројки применуваат физичко-хемиски методи за прочистување – седиментација, неутрализација, флокулација и филтрација – со цел да се отстранат тешките метали и хемикалите пред водата да се испушти во природата.

4.1.13. Отпад и управување со талози

Во процесот на флотација и металуршка обработка се создаваат огромни количини на цврст **отпад** – талози и троска. Овие Материјали содржат преостанати метали и сулфиди кои, под влијание на дождовна вода, можат да создадат киселински рударски дренажни води (*acid mine drainage*). Оваа појава предизвикува долгорочно загадување на почвата и водните текови.

Затоа, отпадните Материјали се сместуваат во контролирани депонии, каде што се стабилизираат и се покриваат со земја или неутрализирачки Материјали (варовник) за спречување на инфилтрација на вода и кислород.

Еколошките проблеми поврзани со производството на бакар вклучуваат:

- емисии на SO₂ и кисели дождови,
- прашина со тешки метали,
- загадени отпадни води и калови талози.

Со современи инженерски и технолошки решенија, како што се системи за рециклирање на гасови, филтрирање на прашина, затворени водни циклуси и третман на отпад, е можно да се минимизира негативното влијание на овој индустриски процес и да се обезбеди одржливо производство на бакар во согласност со најдобрите достапни техники (БАТ) и европските еколошки стандарди.

4.2. Хидрометалургија на бакар

Хидрометалургијата на бакар претставува современ и еколошки поефикасен метод за издвојување и прочистување на бакарот од рудите, во споредба со традиционалните пирометалуршки процеси. Овој пристап се заснова на употреба на водени раствори и хемиски реагенси за растворање (лужење) на металните соединенија и нивно последователно издвојување во метална форма.

Методот е особено применлив кај сиромашни руди (со ниска содржина на бакар) или оксидни руди, каде што класичните термички процеси не се економски исплатливи.

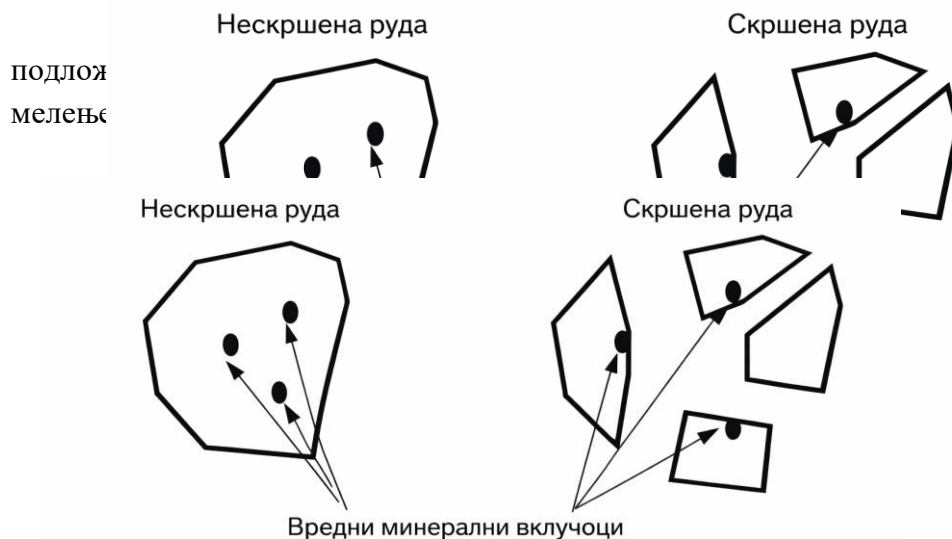
4.2.1. Предности на хидрометалургијата

- Многу поеколошка во споредба со пирометалургијата, бидејќи не се користат високи температури и нема согорување на сулфиди.
- Минимални емисии на гасови – само мала количина на гасови се ослободува во атмосферата, за разлика од пирометалуршките процеси каде се создава SO_2 .
- Безбедна работа и чиста технологија – речиси и да нема емисии на цврсти честички, а процесот може да се одвива во затворени системи.
- Можност за автоКаменецизација и континуирано производство – процесите се контролираат преку раствори и електрохемиски услови, со што се зголемува ефикасноста и безбедноста.

4.2.2. Недостатоци

- Процесот бара голема количина на вода, што создава ризик за контаминација на подземните и површинските води.
- Отпадните води содржат растворени метални соединенија, хелатни комплекси и органски растворувачи, кои можат да предизвикаат загадување доколку не се третираат правилно.

- Потребна е континуирана регенерација и филтрација на растворот, со цел да се намали загубата на реагенси и да се овозможи стабилност на процесот.



Слика 4.10. Подготовка на рудата

Целта е да се зголеми површината на зрната и да се овозможи контакт помеѓу бакарните минерали (оксиди и сулфиди) и растворот за лужење.

- Рудите со висока содржина на бакар (*high-grade ores*) се дробат подетално, за да се ослободи што поголем дел од металната фаза.
- Кај сиромашните руди (*low-grade ores*) се врши помало дробење, бидејќи прекумерната обработка би била економски неисплатлива.

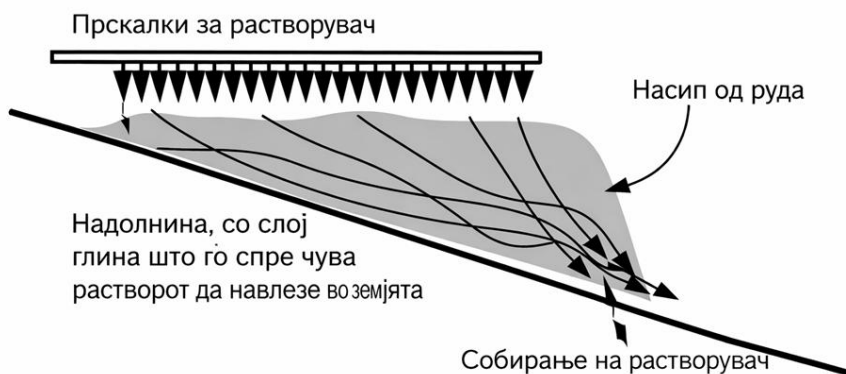
Кога е можно, се врши преконцентрација на рудата, со што се елиминира Материјалот кој содржи минимални количества бакар.

4.2.4. Лужење

Лужењето претставува растворање на бакарните минерали со помош на киселински или базни раствори, при што бакарот преминува во растворлива форма (Cu^{2+}). Постојат три главни методи на лужење:

(а) *Dump leaching* – лужење на насипи

Рудата се натрупува во големи насипи на отворен простор. Преку неа се полева растворот за лужење, кој полека навлегува во Материјалот.



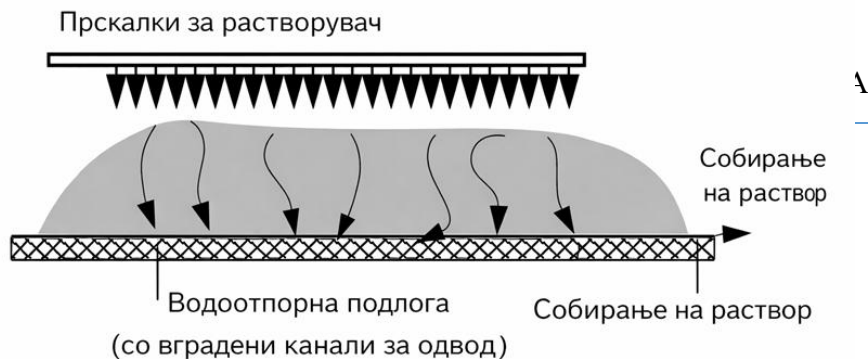
Слика 4.10. *Dump leaching* – лужење на насипи

Растворот што истекува од дното (*runoff*) се собира и се обработува за издвојување на бакарот.

Процесот е многу бавен и може да трае месеци или години, со искористеност од околу 60 % бакар.

(б) *Heap leaching* – лужење на купови

Овој метод е поусовршен – рудата претходно се дроби до големина на чакал и се поставува врз специјални водонепропустливи подлоги (*pads*).



Слика 4.11. Heap leaching – лужење на купови

Растворот за лужење циркулира низ купот 6 – 12 месеци, а потоа се заменува со свежа руда.

Методот овозможува подобра контрола, повисока ефикасност и минимално загадување.

(в) *Bacterial leaching* – биолужење

Во некои случаи се користат бактерии (*Thiobacillus ferrooxidans*) кои ја катализираат оксидацијата на сулфидите, овозможувајќи бакарот полесно да се раствори во растворот. Овој метод е еколошки и нискоенергетски, но бавен.

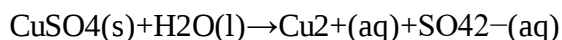
4.2.5. Реакции на лужење

Типот на рудата го одредува видот на реакцијата – неоксидативна или оксидативна.

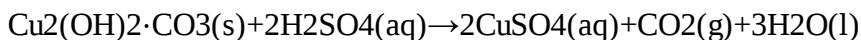
(а) Неоксидативно лужење

Во овие реакции нема промена на оксидациониот број. Примери:

1. Растворање на бакар сулфат со вода:



2. Растворање на алкални Материјали со киселина:



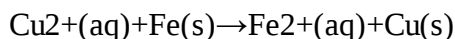
4.2.6. Издвојување на металот

Откако бакарот ќе се раствори, потребно е повторно да се издвои во цврста форма.

Ова може да се постигне на два начина:

(а) Хемиско издвојување

Бакарот се таложи на површината на железо, според реакцијата:



Овој процес се базира на разликата во електродните потенцијали:

$$\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}: E^{\circ} = +0.34\text{V}$$

$$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}: E^{\circ} = -0.44\text{V}$$

Бидејќи бакарот има повисок (попозитивен) редукциски потенцијал, тој се редуцира, а железото се оксидира.

Во практиката, растворот што содржи бакарни јони се пропушта преку слој од железен отпад (scrap iron), каде бакарот се таложи на површината како метален слој. За да биде процесот ефикасен, потребна е голема површина на контакт помеѓу растворот и железото.

(б) Електрохемиско издвојување

Во современата практика, бакарот најчесто се издвојува електролитски, со што се добива висока чистота (99,9 % Cu). Електролизата се изведува во раствор од бакар сулфат, каде бакарот се таложи на катодата како чист метал.

Хидрометалургијата на бакар претставува алтернатива со значителни предности во однос на традиционалната пирометалургија. Таа овозможува економично искористување на сиромашните руди, намалување на емисиите и подобра енергетска ефикасност, иако бара строга контрола на отпадните раствори.

4.2.7. Електрохемиско издвојување на бакар

Електрохемиското издвојување на бакар, познато како електровининг (*electrowinning*), претставува завршна и клучна фаза во хидрометалуршкиот процес за добивање метален бакар со висока чистота.

По фазата на лужење, кога бакарот е присутен во раствор во форма на бакарни јони (Cu^{2+}), овој процес овозможува директно таложување на чист метал на катодата преку електрохемиска реакција.

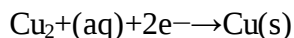
Електровинингот се користи не само за бакар, туку и за други метали како цинк, никел, злато и сребро, но кај бакарот има особено голема примена поради високата ефикасност и чистота на производот (99,9 – 99,99 %).

Во процесот на електровининг, се пропушта електрична струја низ раствор (електролит) кој содржи бакарни јони. Овој раствор најчесто е воден раствор на бакар сулфат (CuSO_4) и сулфурна киселина (H_2SO_4).

Во електролитната ќелија се наоѓаат две електроди:

- **Катода (негативна електрода)** – на неа се таложува чист бакар во метална форма.
- **Анода (позитивна електрода)** – изработена е од инертен Материјал (на пример, олово, титан или графит) кој не се оксидира и не реагира со растворот.

Кога низ електролитот се пропушта постојана струја (DC), на катодата се одвива редукција на бакарните јони:



Бакарот се таложува на катодата како чист метален слој, кој постепено се задебелува и се собира како финален производ.

На анодата, пак, нема значителна реакција, бидејќи Материјалот е инертен и не се раствора – тоа овозможува процесот да биде стабилен и континуиран.

4.2.7.1. Услови и Материјали

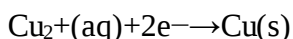
- **Анода:** мора да биде инертна за да не реагира со растворот и да не го контаминира металот. Во индустриските постројки најчесто се користат оловно-калциумски легури (Pb-Ca), олово со сребро (Pb-Ag), или титан, поради нивната отпорност на оксидација.

- Катода: обично е изработена од не'рѓосувачки челик (*stainless steel*) или чисто бакарно платно, кое подоцна се одвојува како катоден бакар.
- Електролит: раствор од CuSO_4 и H_2SO_4 , со pH вредност помеѓу 1 и 2.

Процесот се изведува при температура од 40 до 60 °C, што овозможува подобра спроводливост и рамномерно таложeње.

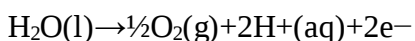
4.2.7.2. Хемиски реакции

- **На катодата**



Се добива чист метален бакар.

- **На анодата**



Мала количина кислород се ослободува во гасовита форма, без влијание врз процесот.

4.2.7.3. Предности на електровинингот

1. Висока чистота на металот – добиениот бакар има чистота до 99,99 %, погоден за електротехничка индустрија.
2. Ниска енергетска потрошувачка – процесот е енергетски ефикасен, особено во споредба со пирометалуршките методи.
3. Контролиран и чист процес – нема гасни емисии, а електролитот може да се рециклира.
4. Можност за континуирано работење – бакарот може да се собира периодично без прекин на процесот.

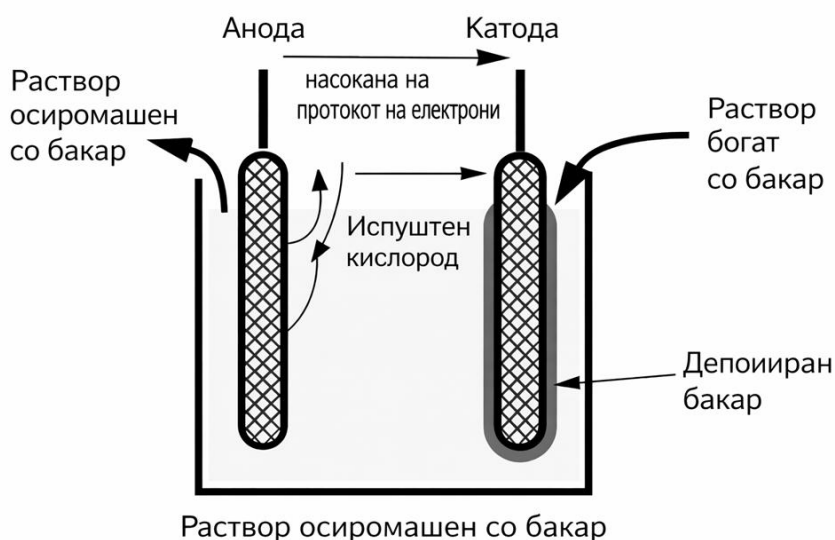
4.2.8. Технолошки аспекти

Процесот на електровининг е еколошки прифатлив, бидејќи не создава SO_2 или прашина. Отпадните раствори се третираат и се рециклираат во затворен систем, со што се минимизира влијанието врз животната средина.

Во современите постројки, целиот процес се автоКаменецизира – контролата на струјата, напонот, рН и температурата се следат преку компјутерски системи, што овозможува висока ефикасност и чистота на производот.

Електрохемиско издвојување (*electrowinning*) претставува најсовремена и најчиста технологија за добивање метален бакар во хидрометалургијата. Со примена на инертни аноди и контролирани услови се добива ултрачист бакар без значителни еколошки последици.

Овој процес ја обединува науката за електрохемијата и инженерството на Материјали, претворајќи го растворот добиен при лужење во висококвалитетен индустриски метал – суштинска компонента на модерната енергетика и технологија.



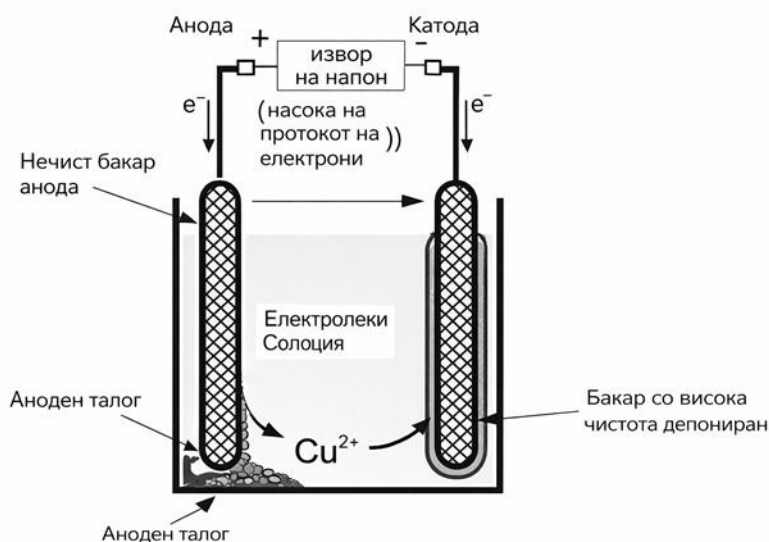
Слика 4.12. Електрохемиско издвојување на бакар

4.2.9. Електрохемиско прочистување на бакар

Електрохемиското прочистување, познато како електрорафинација (*electrorefining*), претставува финална и најпрецизна фаза во процесот на добивање бакар. По електровинингот, каде што се добива суров (*blister*) бакар со чистота од околу 98 – 99 %, металот се подложува на

електрохемиско прочистување со цел да се добие бакар со екстремно висока чистота (99,99 % Cu), погоден за електротехничка и високотехнолошка примена.

Овој процес ја искористува разликата во електродните потенцијали (E°) помеѓу различните метали присутни во анодата – бакарот, железото, цинкот, среброто, златото и други примеси. Преку контролирана електролиза се овозможува селективна оксидација и редукција, со што бакарот се депонира на катодата како чист метал, додека останатите елементи се одвојуваат или во растворот, или како аноден талог.



Слика 4.13. Електрохемиска рафинација на бакар да се преведе дел од сликата

4.2.9.1. Принцип на електрорафинација

Во електрохемиската ќелија се наоѓаат:

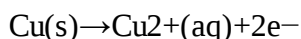
- **Аноди** – изработени од непрочистен (*blister*) бакар, кој содржи примеси од железо, цинк, никел, олово, сребро и злато.

- **Катоди** – тенки листови од чист бакар, кои служат како подлога за таложење на прочистениот метал.
- **Електролит** – воден раствор од бакар(II)-сулфат (CuSO_4) и сулфурна киселина (H_2SO_4), кој овозможува пренос на јоните Cu^{2+} низ растворот.

Кога низ системот се пропушта постојана електрична струја (DC), се одвиваат следните реакции:

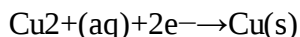
4.2.9.2. Хемиски реакции во електрорафинација

На анодата (оксидација):



Бакарот од анодата се раствора во електролитот како јони Cu^{2+} .

На катодата (редукција):



Јоните Cu^{2+} се редуцираат и се таложат на катодата како чист метален бакар.

На овој начин, бакарот мигрира од анодата кон катодата, притоа прочистувајќи се од примесите.

4.2.9.3. Селективно одвојување на металите

- според електродниот потенцијал
1. **Анодите** од суров бакар постепено се раствораат во електролитот.
 2. **Бакарните јони (Cu^{2+})** мигрираат кон катодата, каде што се редуцираат и се таложат како чист бакар.
 3. **Металите со помал редукциски потенцијал (Fe, Zn, Ni)** остануваат растворени во електролитот и не се таложат.
 4. **Благородните метали (Au, Ag, Pt)** не се оксидираат на анодата, туку се таложат на дното на ќелијата во форма на аноден талог (*sludge*).

Овој аноден талог претставува вреден секундарен производ, кој содржи благородни метали што подоцна се рециклираат и се прочистуваат во посебни постројки.

Различните метали во анодата се однесуваат различно, во зависност од нивниот стандарден редукциски потенцијал ($E^{\circ}\text{red}$).

По неколкунеделна електролиза, на катодите се добива ултрачист бакар со чистота од 99,99 %, кој потоа се топи и се обликува во плочи, жици или катодни ленти. Благодарение на оваа чистота, бакарот добиен со електрорафинација се користи во електроника, телекомуникации, електрични кабли, мотори и енергетски системи.

Табела 4.1. Однесување на металите во зависност од нивниот стандарден редукциски потенцијал ($E^{\circ}\text{red}$).

Метал	$E^{\circ}\text{red}$ (V)	Однесување во процесот
Zn, Fe	помал (понегативен) од Cu	Остануваат во растворот како јони (не се таложат)
Cu	+0,34	Растворање на анодата и таложување на катодата
Ag, Au, Pt	поголем (попозитивен) од Cu	Не се раствораат → паѓаат на дното како аноден талог

4.2.10. Еколошки и економски аспекти

Процесот на електрорафинација е затворен систем, што значи дека електролитот може да се рециклира и повторно да се користи, а анодниот талог се собира и се преработува без загадување.

Енергетската потрошувачка е релативно ниска (околу 200 – 300 kWh по тон бакар), што го прави процесот економски одржлив и еколошки прифатлив.

Електрохемиското прочистување (*electrorefining*) е најпрецизниот метод за добивање високочист бакар, кој комбинира ефикасност, селективност и одржливост. Преку прецизна контрола на електродниот потенцијал и составот на електролитот, се овозможува потполно одвојување на бакарот

од примесите, а добиениот метал е идеален за технолошки и индустриски примени со високи стандарди на спроводливост и чистота.

4.3. Прашања и одговори

1. Зошто бакарот се смета за „стратегиски“ индустриски метал?

Одговор: Поради многу висока електрична и топлинска спроводливост, добра пластичност и корозивна отпорност, што го прави клучен за енергетика, електротехника и технологија.

2. Кои се најчестите форми на бакар во природата?

Одговор: Најчесто сулфидни руди (CuFeS_2 , Cu_2S , Cu_5FeS_4), поретко оксидни/карбонатни (Cu_2O , малахит, азурит) и ретко самороден бакар.

3. Кои се двата главни технолошки пристапа за производство на бакар?

Одговор: (1) Пирометалуршки процеси за сулфидни руди и (2) хидрометалуршки процеси за сиромашни и оксидни руди.

4. Која е улогата на дробење и мелење пред металуршката обработка?

Одговор: Да се зголеми специфичната површина и да се ослободи бакарниот минерал од јаловината, што ја подобрува флотацијата/лужењето.

5. Што е флотација и која е нејзината цел кај бакарните руди?

Одговор: Физичко-хемиски процес за одвојување на бакарните минерали од јаловината; се добива концентрат типично со ~20–35% Cu.

6. Кои реагенси најчесто се користат во флотација и зошто?

Одговор: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ за рН-контрол, пенообразувач (на пр. борово масло), стабилизатор (алкохоли) и колектори (ксантати/дитиофосфати) за хидрофобизација на бакарните минерали.

7. Зошто pH-контролата е важна во флотација на халкопирит?

Одговор: Овозможува селективна адсорпција на колекторот на халкопирит (CuFeS_2) и потиснување на несакани минерали (на пр. пирит).

8. Што е калцинација и кај кои бакарни руди е посебно релевантна?

Одговор: Загревање со ограничен O_2 за разложување на нестабилни компоненти (карбонати/хидрати); важна кај малахит и азурит (премин кон CuO).

9. Што е пржење (roasting) кај сулфидни концентрати на бакар?

Одговор: Делумна оксидација со воздух/кислород при $\sim 500\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$ за отстранување дел од сулфурот како SO_2 и подготовка за топење.

10. Која е главната цел на пржењето во пирометалургијата на бакар?

Одговор: Намалување на сулфурот (SO_2), оксидација на железо ($\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$) и предзагревање за поефикасно топење.

11. Што се добива во фазата на топење (smelting) на бакарен концентрат?

Одговор: Две стопени фази: мат/каменец (сулфидна фаза богата со Cu_2S и FeS) и троска (оксидно-силикатна фаза).

12. Која е улогата на SiO_2 како флукс при топење?

Одговор: Реагира со FeO и формира железен силикат (FeSiO_3) во троската, со што железото се извлекува од матот.

13. Што претставува бакарниот мат (каменец)?

Одговор: Стопена сулфидна смеса (главно Cu_2S и FeS) што е главен носител на бакарот за понатамошна конверзија.

14. Што е конвертирање и која е неговата основна цел?

Одговор: Оксидационо рафинирање на матот со O_2 ; прво се отстранува Fe како троска, потоа S како SO_2 , за да остане метален бакар.

15. Кои се двете главни фази на конверзијата?

Одговор: (1) Оксидација на $FeS \rightarrow FeO$ и шлакување со SiO_2 ($FeSiO_3$), (2) Оксидација на $Cu_2S \rightarrow Cu + SO_2$.

16. Што е блистер бакар и зошто така се нарекува?

Одговор: Суров бакар со $\sim 98-99\%$ Cu; има „порозна/меуреста“ површина поради ослободување гасови (главно SO_2) при ладење.

17. Која е улогата на електролитското рафинирање (electrorefining)?

Одговор: Да се добие катоден бакар со ултрависока чистота ($\approx 99,99\%$ Cu) преку растворање на анодата и таложење на катодата.

18. Кои се електродните реакции при електрорафинирање на бакар?

Одговор: Анода: $Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$ (оксидација); Катода: $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$ (редукција).

19. Како се однесуваат примесите при електрорафинирање?

Одговор: Пореактивни метали (Fe, Zn, Ni) остануваат во растворот како јони; благородни метали (Ag, Au, Pt) се таложат како аноден талог (слац).

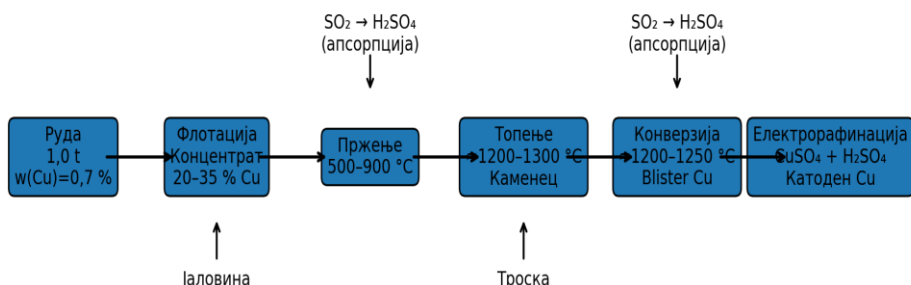
20. Кои се клучните еколошки предизвици во производството на бакар и типични мерки?

Одговор: Емисии на SO_2 (кисели дождови), прашина со тешки метали и отпадни води/талози; мерки: собирање SO_2 за H_2SO_4 , високоефикасни филтри, затворени водни циклуси и стабилизација/контролиран депониј на отпад.

4.4.ИСПИТНА ЗАДАЧА

Производство на бакар: масен биланс (1 t руда) и термодинамичка анализа

Напомена: Задачата е конципирана како учебнички/испитен пример со јасно наведени претпоставки. Во реална постројка, вредностите се калибрираат со мерени податоци и фабрички извештаи.



Слика 1. Шематски технолошки тек на производство на бакар (со споредни текови)

1. ЗАДАЧА (услов)

Дадена е сулфидна бакарна руда со маса $m_0 = 1,0 \text{ t}$ и содржина $w(\text{Cu}) = 0,7 \text{ \%}$ (мас.). Рудата се преработува по класичен индустриски пат:

флотација → пржење → топење → конверзија → електрорафинација.

2. ДАДЕНИ ПРЕТПОСТАВКИ (за пресметковниот дел)

За целите на задачата се усвојуваат следните инженерски претпоставки:

- Степен на искористување на Cu во флотација: $R_1 = 0.900$.
- Содржина на Cu во концентрат: $w(\text{Cu})_k = 25.0 \text{ \%}$.
- Искористување на Cu од концентрат до blister (топење+конверзија): $R_2 = 0.980$.
- Чистота на blister бакар: $w(\text{Cu})_\beta = 98.50 \text{ \%}$.

- Искористување на Cu во електрорафинација (од blister до катода): $R_3 = 0.997$.
- Чистота на катоден бакар: $w(\text{Cu})_c = 99.99 \%$.

3. БАРАЊА

- 3.1. Направете масен биланс на бакар за $m_o = 1,0 \text{ t}$ руда: определете маса на концентрат, јаловина, blister бакар и катоден бакар.
- 3.2. Прикажете табели „влез/излез“ по фази (минимум: руда → концентрат → blister → катода).
- 3.3. Наведете ги главните хемиски реакции за пржење, топење и конверзија и објаснете ја селективноста (Fe пред Cu).
- 3.4. Додајте термодинамичка интерпретација со Ellingham-пристап (квалитативно).
- 3.5. Објаснете концепт за контрола на SO_2 (фаќање, конверзија во H_2SO_4 , намалување на емисии).

4. РЕШЕНИЕ – ПРЕСМЕТКОВЕН ДЕЛ (масен биланс за 1 t руда)

4.1. Бакар во влезната руда

$$m(\text{Cu})_o = m_o \cdot w(\text{Cu}) = 1000 \text{ kg} \cdot 0.0070 = 7.000 \text{ kg Cu}$$

4.2. Флотација (руда → концентрат + јаловина)

$$m(\text{Cu})_k = R_1 \cdot m(\text{Cu})_o = 0.900 \cdot 7.000 = 6.300 \text{ kg Cu}$$

$$m(\text{концентрат}) = m(\text{Cu})_k / w(\text{Cu})_k = 6.300 / 0.25 = 25.200 \text{ kg}$$

$$m(\text{јаловина}) = m_o - m(\text{концентрат}) = 1000 - 25.200 = 974.800 \text{ kg}$$

$$\text{Загуба на Cu во јаловина: } m(\text{Cu})_j = m(\text{Cu})_o - m(\text{Cu})_k = 0.700 \text{ kg Cu}$$

4.3. Топење + конверзија (концентрат → blister)

$$m(\text{Cu})_b = R_2 \cdot m(\text{Cu})_k = 0.980 \cdot 6.300 = 6.174 \text{ kg Cu}$$

$$m(\text{blister}) = m(\text{Cu})_b / w(\text{Cu})_b = 6.174 / 0.985 = 6.268 \text{ kg}$$

$$\text{Загуба на Cu во пирометалургија (троска/прашина): } 0.126 \text{ kg Cu}$$

4.4. Електрорафинација (blister → катоден бакар)

$$m(\text{Cu})_c = R_3 \cdot m(\text{Cu})_p = 0.997 \cdot 6.174 = 6.155 \text{ kg Cu}$$

$$m(\text{катоден бакар}) = m(\text{Cu})_c / w(\text{Cu})_c = 6.155 / 0.9999 = 6.156 \text{ kg}$$

Загуба на Cu во електролиза (раствор/талог): 0.019 kg Cu

Табела 1. Сумиран масен биланс на бакар (1 t руда)

Тек	Маса на тек (kg)	Cu во тек (kg)	Забелешка
Влезна руда	1000.0	7.000	Дадено
Концентрат	25.200	6.300	$R_1=0.90$, $w(\text{Cu})_k=25.0\%$
Јаловина	974.800	0.700	Загуба по флотација
Blister бакар	6.268	6.174	$R_2=0.98$, $w(\text{Cu})_p=98.50\%$
Катоден бакар	6.156	6.155	$R_3=0.997$, $w(\text{Cu})_c=99.99\%$

5. ТАБЕЛИ „ВЛЕЗ / ИЗЛЕЗ“ ПО ФАЗИ

Влез	Излез
Руда: 1000 kg, Cu=7.000 kg Реагенси + вода + воздух	Концентрат: 25.200 kg, Cu=6.300 kg Јаловина: 974.800 kg, Cu=0.700 kg

Табела 2. Флотација (руда → концентрат + јаловина)

Влез	Излез
Концентрат + воздух/кислород (контролирана оксидација)	Делумно оксидиран материјал за топење Процесен гас: SO_2 (за киселинска постројка)

Табела 3. Пржење (концентрат → оксидиран материјал + SO_2)

Влез	Излез
Пржен концентрат + SiO_2 (топител)	Каменец ($\text{Cu}_2\text{S}+\text{FeS}$) + троска (FeSiO_3)

Табела 4. Топење (оксидиран материјал + $\text{SiO}_2 \rightarrow$ каменец + троска)

Влез	Излез
Каменец + вдувување O_2 ; додавање SiO_2	Blister бакар ($\approx 98\text{--}99\%$) Троска SO_2 (фаќање и апсорпција)

Табела 5. Конверзија (каменец + O_2 + $\text{SiO}_2 \rightarrow$ blister + троска + SO_2)

Влез	Излез
Аноди од blister бакар + $\text{CuSO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$ електролит	Катоден бакар 99,99 % Аноден талог (Ag, Au, Pt)

6. ХЕМИСКИ РЕАКЦИИ И ТЕРМОДИНАМИКА

6.1. Главни реакции (пиromеталуршки дел)

Пржење (пример за халкопирит): $2\text{CuFeS}_2 + 4\text{O}_2 \rightarrow \text{Cu}_2\text{S} + 2\text{FeO} + 3\text{SO}_2 \uparrow$

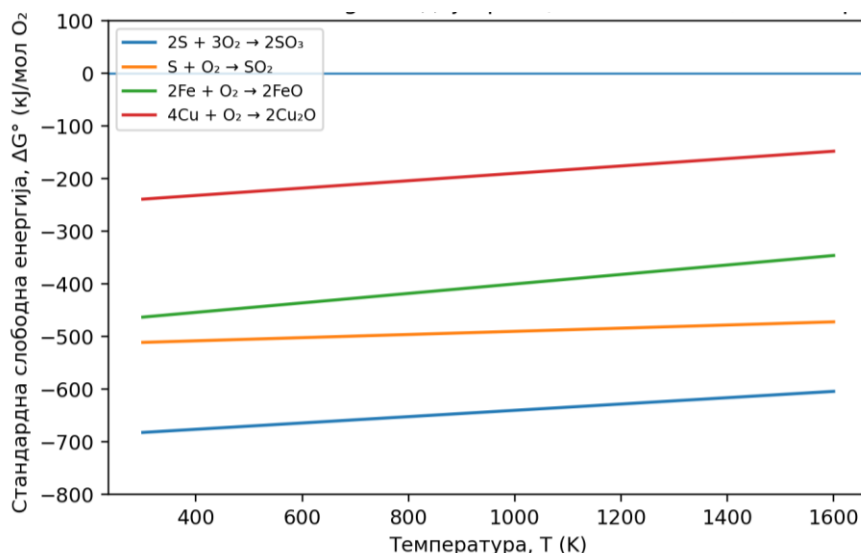
Производство на троска: $\text{FeO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{FeSiO}_3$ (троска)

Конверзија (отстранување Fe): $2\text{FeS} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeO} + 2\text{SO}_2 \uparrow$

Конверзија (добивање Cu): $\text{Cu}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cu} + \text{SO}_2 \uparrow$

6.2. Ellingham-пристап (квалитативна анализа)

Ellingham-дијаграмот го прикажува температурниот тренд на ΔG° за реакции на оксидација. Колку е пониска (понеГативна) линијата, толку реакцијата е потермодинамички поповолна. Во системот бакар–железо–сулфур–кислород, линиите за формирање на $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ и SO_2 се наоѓаат под линиите за оксидација на бакарните оксиди, што објаснува зошто при конверзија прво се оксидира FeS (железото), а бакарот останува во сулфидна/метална фаза до завршната фаза.



Слика 2. Схематски Ellingham-дијаграм за релевантни оксидации (квалитативно)

Практично, селективноста се контролира преку „кислороден потенцијал“ во стопеницата (парцијален притисок на O_2 и однос на оксидни/сулфидни компоненти), така што се овозможува целосно шлакување на железото

($FeO \rightarrow FeSiO_3$) пред да започне оксидацијата на Cu_2S до Cu .

6.3. SO_2 контрола (принцип и примерна пресметка)

Во современи постројки, процесните гасови од пржење и конверзија се собираат во затворен систем, се прочистуваат од прашина и се насочуваат кон киселинска постројка каде SO_2 се оксидира до SO_3 и се апсорбира во вода за добивање H_2SO_4 . На тој начин, SO_2 од загадувач се претвора во производ.

Примерна (илустративна) оценка на SO_2 : ако бакарот во концентратот е врзан како халкопирит ($CuFeS_2$), на 1 mol Cu доаѓаат 2 mol S . За $m(Cu)_k = 6.300$ kg, добиваме поврзан сулфур ≈ 6.358 kg S , што одговара на теоретски ≈ 12.703 kg SO_2 при целосна оксидација до SO_2 . Во реалност, количината може да биде поголема поради присуство на FeS_2 и други сулфиди.

Листа на кратенки, симболи и индекси поврзани со задачата

- **m** – маса, kg или t
- **m_o** – вкупна маса на влезната руда
- **m(Cu)** – маса на бакар во даден тек
- **w(Cu)** – масен удел (масен процент) на бакар во материјалот
- **t** – тона (1000 kg)

- **o** – почетна состојба / влезна руда
 - *пример:* m(Cu)_o – маса на Cu во влезната руда
- **k** – концентрат (по флотација)
 - *пример:* w(Cu)_k – масен удел на Cu во концентрат
- **j** – јаловина
 - *пример:* m(Cu)_j – загуба на Cu во јаловина
- **β** – blister бакар (по топење и конверзија)
 - *пример:* w(Cu)_β – чистота на blister бакар
- **c** – катоден бакар (по електрорафинација)
 - *пример:* w(Cu)_c – чистота на катоден бакар

- **R₁** – степен на искористување на Cu во флотација
 - (од руда → концентрат)
- **R₂** – степен на искористување на Cu во пирометалургија
 - (топење + конверзија: концентрат → blister)
- **R₃** – степен на искористување на Cu во електрорафинација
 - (blister → катода)

Забелешка:

R = m(Cu)_{излез} / m(Cu)_{влез}, бездимензионална величина (0–1)

- **Flotation (флотација)** – физичко-хемиски процес за збогатување на рудата
- **Roasting (пржење)** – контролирана оксидација на сулфидни минерали
- **Smelting (топење)** – пирометалуршки процес за добивање каменец
- **Converting (конверзија)** – оксидационо прочистување на каменец
- **Electrorefining (електрорафинација)** – електролитско прочистување на бакар

- **Концентрат** – збогатен производ богат со Cu сулфиди
- **Јаловина** – отпаден материјал сиромашен со Cu
- **Каменец (matte)** – сулфидна стопеница (Cu₂S + FeS)
- **Blister бакар** – суров бакар (≈98–99 % Cu)

- **Катоден бакар** – високо чист бакар (99,99 % Cu)
- **Cu** – бакар
- **Fe** – железо
- **S** – сулфур
- **O₂** – молекуларен кислород
- **SO₂** – сулфур диоксид
- **SO₃** – сулфур триоксид
- **H₂SO₄** – сулфурна киселина
- **SiO₂** – силициум диоксид (топител)
- **FeO** – железен(II) оксид
- **FeSiO₃** – железен силикат (троска)
- **Cu₂S** – бакар(I) сулфид
- **FeS** – железен сулфид
- **CuFeS₂** – халкопирит

7. Термодинамички симболи

- **ΔG°** – стандардна Гибсова слободна енергија на реакција
- **Ellingham-дијаграм** – график на ΔG° во зависност од температурата
- **O₂ потенцијал** – ефективен оксидационен капацитет на стопеницата
- **p(O₂)** – парцијален притисок на кислород
- **BAT** (*Best Available Techniques*) – најдобри достапни техники
- **SO₂ capture** – фаќање и контрола на сулфур диоксид
- **Acid plant** (киселинска постројка) – индустриска постројка за H₂SO₄

Поглавје 5 Производство на злато

Златото (Au) претставува еден од највредните и најстарите метали познати на човештвото, со исклучителна историска, економска и технолошка важност. Неговата висока хемиска стабилност, одлична електрична спроводливост, корозивна отпорност и способноста за изменување на својата форма под дејство на надворешни сили го прават незаменлив Материјал не само во накитната индустрија, туку и во современата електроника, медицината, катализата и финансискиот сектор. Производството на злато е комплексен металуршки процес кој ги обединува рударските, хемиските и инженерските дисциплини, со цел ефикасно издвојување на металот од природните минерални суровини.

Златото во природата најчесто се среќава во елементарна форма или во асоцијација со сулфидни минерали, кварцни жили и секундарни алувијални наслаги. Концентрацијата на злато во рудите обично е многу ниска, што бара примена на прецизни и технолошки напредни методи за негово добивање. Современото производство на злато вклучува низа фази: експлоатација на рудата, дробење и мелење, физичка и хемиска концентрација,

хидрометалуршка екстракција и финално рафинирање до висока чистота.

Особено значајна улога во индустриското производство имаат хидрометалуршките процеси, како што е цијанизацијата, кои овозможуваат висока ефикасност при екстракција на злато од сиромашни руди. Истовремено, зголемената еколошка свест и строгите регулативи доведоа до развој на нови, поодржливи технологии, вклучувајќи алтернативни лужни реагенси, биолошки методи и затворени процесни системи со минимално влијание врз животната средина.

Ова поглавје има за цел да даде систеКаменецки преглед на основните принципи, технологии и современи трендови во производството на злато, со акцент на технолошките процеси, термодинамичките и кинетичките аспекти, како и еколошките и економските предизвици поврзани со оваа гранка на екстрактивната металургија.

5.1. Историски методи за добивање злато

Златото претставува еден од првите метали што човекот ги користел уште во праисторискиот период, благодарение на неговата појава во елементарна форма, високиот сјај и отпорноста кон корозија. За разлика од повеќето други метали, златото не барало сложени металуршки процеси за негово првично добивање, што овозможило рана примена во накит, религиозни предмети и трговија. Историскиот развој на методите за добивање злато тесно е поврзан со технолошкиот напредок, развојот на рударството и еволуцијата на хемиското знаење.

Најстарите методи за добивање злато се базирале на гравитационата сепарација, поради високата густина на златото ($19,3 \text{ g/cm}^3$). Во древните цивилизации, како Египет, Месопотамија и Кина, златото се добивало преку испирање на алувијални наслаги во реки и потоци. Рудата се мешала со вода во плитки садови или дрвени корита, при што полесните честички се испирале, а златните зрнца се таложеле на дното.



Слика 5.1. Гравитациона сепарација

Подоцна се развиле уреди како златарска чинија (*gold pan*) и канали со пречки (*sluice boxes*), кои ја зголемувале ефикасноста на процесот. Овие методи се карактеризираат со ниска енергетска побарувачка, но ограничена примена само кај руди и наслаги со релативно висока содржина на слободно злато.

5.1.1. Амалгамирање со жива

Со развојот на хемиското знаење, во антиката и Средниот век се вовел процесот на амалгамирање, при кој златото реагира со жива (Hg) и формира амалгам. Овој метод бил широко применуван од Римјаните, а подоцна и во рудниците во Јужна Америка за време на шпанската колонијална ера.

Процесот вклучувал мешање на ситно сомелена руда со жива, при што златото се растварало во живата. Потоа амалгамот се загревал, при што живата испарувала, а златото останувало во цврста форма. Иако методот овозможувал релативно висока искористеност, тој имал сериозни здравствени и еколошки последици поради токсичноста на живата.



Слика 5.2. Процес на амалгамација на злато со жива

5.1.2. Термички методи и топење

Во случаи кога златото било добиено во концентрирана форма, се применувале **термички процеси на топење** во примитивни печки. Овие печки користеле јаглен или дрво како гориво, а топители како силициум диоксид и варовник се додавале за врзување на нечистотиите во троска.

Топењето овозможувало добивање компактно злато и претставувало важен чекор кон развојот на металуршките печки и рафинирачките техники. Иако температурната контрола била

ограничена, овие процеси поставиле темели за понатамошен развој на пирометалургијата.



Слика 5.3. Пирометалуршко топење злато

5.1.3. Ран хидрометалуршки пристап

Кон крајот на XVIII и почетокот на XIX век започнале првите обиди за хидрометалуршко извлекување на злато со употреба на киселини и солни раствори. Иако овие методи биле технолошки несовршени и несекономични, тие го означиле преминот од исклучиво механички и термички техники кон хемиски контролирани процеси.

Овие рани експерименти директно придонеле за развојот на современите процеси, како цијанизацијата, која подоцна станала доминантна индустриска технологија за добивање злато.



Слика 5.4. Рано хидрометалуршко растворање

5.1.4. Значење на историските методи

Иако голем дел од историските методи денес се напуштени или строго регулирани, нивното значење за развојот на екстрактивната металургија е огромно. Тие претставуваат основа за разбирање на физичките и хемиските принципи што се применуваат и во современите технологии за добивање злато.

5.2. Современи методи за експлоатација

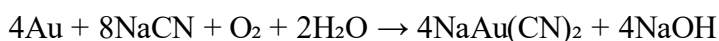
Современото рударство вклучува површинско (*open pit*) и подземно (*underground*) копање.

Најдлабокиот златен рудник Мпоненг во Јужна Африка достигнува длабочина од 3778 m под земја, со температури над 55 °C.

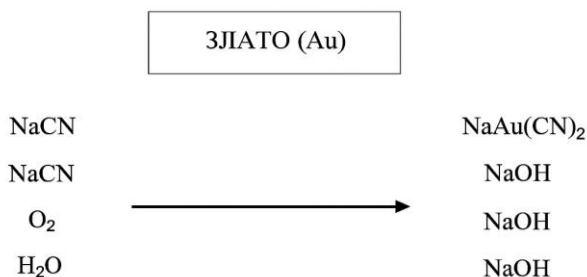
5.2.1. Цијанидно лужење

Цијанидното лужење претставува најшироко користен метод за извлекување злато.

Процесот се базира на Elsener реакцијата:



Elsener реакција

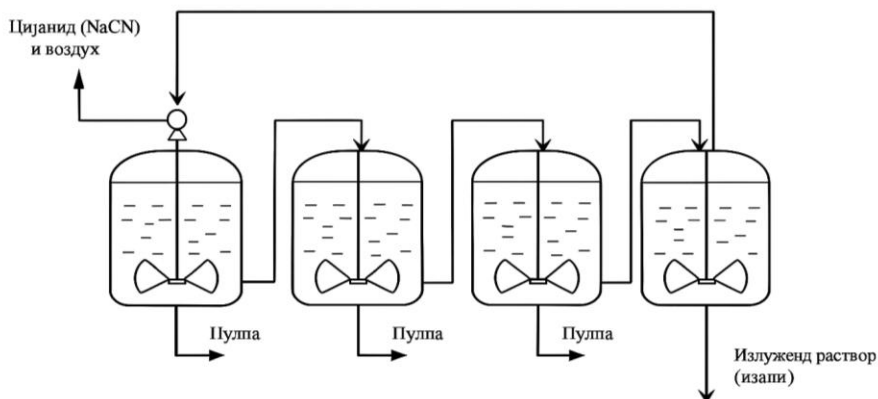


Слика 5.5. Дијаграм за *Elsener* реакција

5.2.2. Агитирано лужење

При агитираното лужење, мелената руда се меша со раствор на NaCN и се аерира во серија од резервоари.

Процесот трае 20 – 40 часа и овозможува висока искористеност на златото.



Слика 5.6. Процес на агитирано лужење – реактори со аерација.

5.2.3. Хип лужење (*Heap Leaching*)

Хип лужењето претставува еден од најважните и најекономични хидрометалуршки процеси за добивање злато од руди со ниска содржина на благороден метал (обично 0,3 – 1,0 g Au по тон руда). Процесот е развиен со цел да овозможи економска обработка на огромни количини на сиромашни руди, кои би биле неисплатливи за класично цијанидно лужење во мешални резервоари.

Технологијата на хип лужење се применува од средината на 1960-тите години, а денес претставува стандарден индустриски метод за обработка на златни и сребрени руди, особено во рудници во САД, Чиле, Перу, Австралија и Казахстан.

5.2.3.1. Технолошки фази на процесот

- *Подготовка на рудата*

Рудата се дроби до крупност од 12 до 25 mm. Дробењето мора да биде вниКаменецелно контролирано за да се избегне создавање прекумерно фини честички кои би ја намалиле пропустливоста на купот.

- *Подготовка на подлогата*

На теренот се поставува непропустлив слој, најчесто од геомембрана (HDPE), кој спречува навлегување на цијанидниот

раствор во подземните води. Понекогаш се додава и дренажен слој со чакал или песок.

- *Формирање на купот (heap stacking)*

Дробената руда се депонира во форма на куп со висина 6 – 10 m, а во големи постројки и до 30 m. Купот се формира во слоеви за да се овозможи рамномерно натопување и стабилност.

- *Нанесување на растворот (irrigation)*

Растворот на NaCN со концентрација 0,02 – 0,05 % се прска преку систем на цевки со прскалки (*drip* или *sprinkler system*). Растворот полака се инфилтрира низ купот со брзина 10 – 20 L/h·m².

- *Лужење и перколација*

Растворот полака се движи низ порите и пукнатините на рудната маса. При контакт со златото и кислородот, се одвива оксидација и создавање на растворлив ауроцијаниден комплекс.

- *Собирање на растворот (collection)*

На дното на купот се наоѓа систем од перфорирани цевки и дренажен слој, кој овозможува собирање на „бремениот“ раствор во колекторски базен.

- *Пренос на раствор за обработка*

Собраниот раствор се пумпа во резервоари за адсорпција на златото на активен јаглен (CIP) **или за** преципитација со цинк (*Merrill–Crowe*).

- *Рециклирање на растворот*

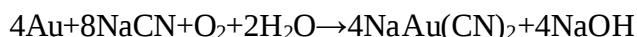
5.2.3.2. Основен принцип

Основната идеја на процесот е едноставна: растворот на натриум цијанид (NaCN) се наноси врз куп (*heap*) од претходно дробена и подготвена руда, и постепено се спушта низ порите на рудната маса. При тоа, **златото се раствора во** форма на комплексниот јон $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$, кој потоа се собира на дното на купот.



Слика 5.7. ШеКаменецки приказ на *Heap leaching* куп

Главната хемиска реакција е истата како кај *Elsener* процесот:



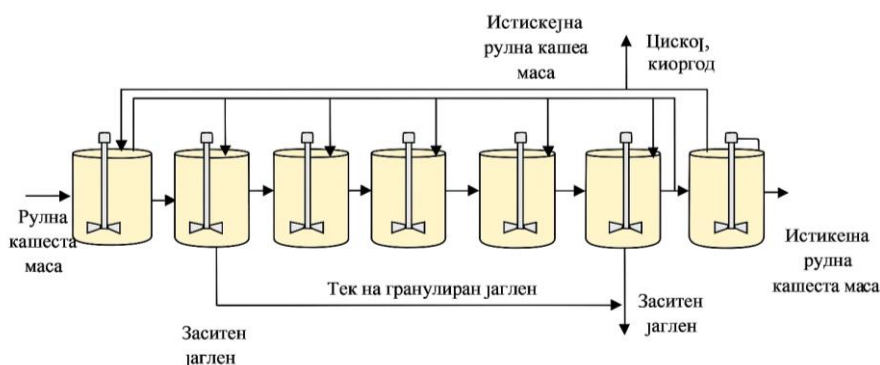
Растворот што излегува од дното, познат како „бремен раствор“ (*pregnant solution*), е богат со растворено злато и се пренесува во системи за адсорпција или преципитација (CIP или *Merrill–Crowe*) каде златото се извлекува. Остатокот од растворот се прочистува и повторно се користи во затворен циклус, што значително ја намалува потрошувачката на реагенси и влијанието врз животната средина.

По издвојување на златото, растворот се прочистува и повторно се користи во процесот, со дополнување на потребна количина NaCN и вар ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) за одржување на $\text{pH} > 10$.

5.3.3. *Carbon-in-Pulp* (CIP) процес

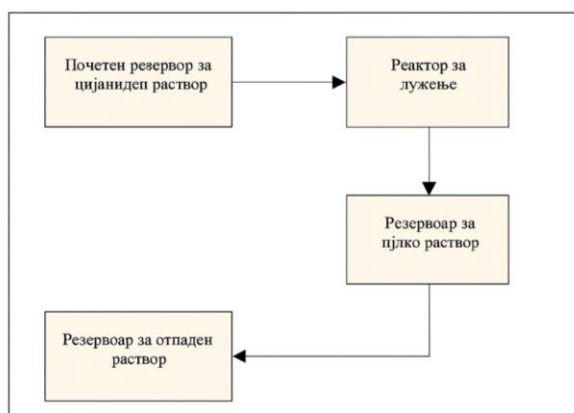
CIP процесот е стандардна постапка за издвојување на злато од цијанидни раствори.

Активниот јаглен ги адсорбира ауроцијанидните јони, а натоварениот јаглен потоа се подложува на елуција и електролиза.



Слика 5.8. Систем на *Carbon-in-Pulp* со серија од 8 резервоари

5.3.3.1. Дијаграм на проток на раствори

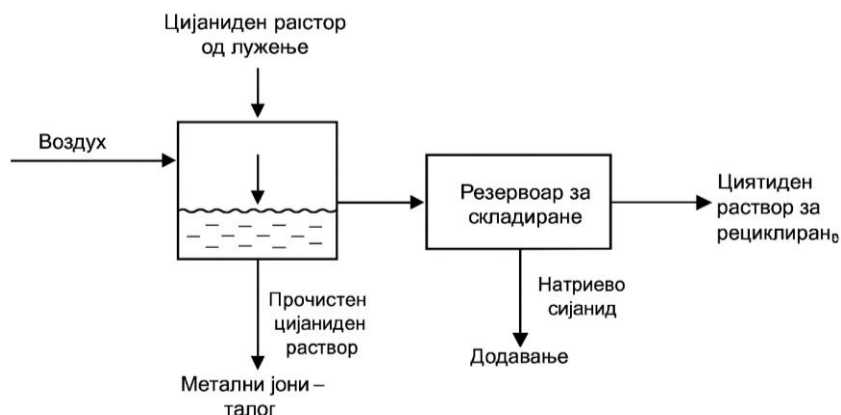


Слика 5.9. Проток на раствори во затворен циклус

При обработката на златната руда, растворот се движи низ повеќе циклуси на лужење, филтрација и реупотреба. Овој затворен систем овозможува оптимална потрошувачка на реагенси и минимален отпад.

5.3.4. Рециклирање и третман на цијаниди

Современите рудници применуваат процеси за уништување на цијаниди како INCO ($\text{SO}_2 + \text{воздух}$), оксидација со H_2O_2 и биодеградација со бактерии. Овие методи обезбедуваат еколошка одржливост на производството.



Слика 5.10. Систем за третман и рециклирање на цијанидни раствори превод во сликата

Табела 5.1. Споредба на методи за извлекување злато

Метод	Тип на процес	Ефикасност (%)	Цена на обработка
Panning/Sluicing	Физички	30 – 50	Многу ниска
Cyanidation (Agitated)	Хемиски	90 – 95	Висока
Heap Leaching	Хемиски	70 – 80	Ниска
CIP	Физичко-хемиски	90 – 99	Средна
Merrill–Crowe	Хемиски	95 – 99	Средна до висока

5.3.5. Контролни параметри и услови

Табела 5.2. Технички параметри на цијанидниот процес

Параметар	Типична вредност
Концентрација на NaCN	0,02 – 0,05 %
pH на растворот	10,5 – 11,0
Висина на купот	6 – 30 m

Параметар	Типична вредност
Брзина на инфилтрација	10 – 20 L/h·m ²
Времетраење на процесот	60 – 120 дена
Ефикасност на извлекување	65 – 80 %

5.3.6. Предности на хип лужењето

- **Економичност:** трошоците се 40 – 60 % пониски во однос на агитираното лужење, бидејќи не се користат мешалки, компресори и резервоари.
- **Флексибилност:** може да се применува директно на терен, без потреба од големи објекти.
- **Природна енергетска ефикасност:** процесот се одвива на атмосферска температура и притисок.
- **Можност за обработка на големи количини:** погоден за руди со ниска содржина на злато и за депонии од претходно ископани Материјали.

5.3.7. Недостатоци

- **Долготрајност:** процесот бара недели или месеци, поради бавната инфилтрација.
- **Ниска ефикасност:** дел од златото останува нерастворено поради недоволна пропустливост или пасивација на честичките.
- **Ризик од еколошко загадување:** постои опасност од истекување на цијаниди доколку непроницаивиот слој се оштети.
- **Ограничена примена:** неподобен за руди со висока содржина на глина или сулфиди, бидејќи се создава запушување на порите.

5.3.8. Мерки за заштита и контрола

Современите постројки применуваат повеќеслојни системи на заштита:

- Геомембрани со дебелина 1,5 – 2 mm, поставени врз дренажен слој.
- Контролни базени за собирање евентуални истекувања.
- Онлајн мониторинг на pH и концентрацијата на CN^- .
- Повторна употреба на растворот во затворен циклус за минимизирање на отпад.

5.3.9. Индустриски примери

1. **Rochester Mine (Невада, САД):** обработува над 20 милиони тони руда годишно со просечна содржина од 0,4 g Au/t.
2. **Јанакоча (Перу):** еден од најголемите heap leaching комплекси во светот, со капацитет од 350 000 тони дневно.
3. **Кумтор (Киргистан):** применува систем со перколирање при ниски температури под 0 °C, користејќи изолациони слоеви за термална стабилност.

Хип лужењето е технолошки едноставен но хемиски прецизен процес, кој овозможува добивање злато на економичен начин од руди со ниска концентрација. Иако има пониска ефикасност од агитираното лужење, неговите ниски капитални трошоци, едноставност и можност за рециклажа на растворот го прават клучна технологија во современата екстрактивна металургија.

Со интегрирање на еколошки мерки, контрола на CN^- раствори и автоКаменецизација, *heap leaching* се смета за одржлив метод на 21 век за извлекување злато во согласност со принципите на зелената металургија.

Историјата на златото е патување од едноставни физички методи до современи хидрометалуршки процеси со висока ефикасност.

Во иднина, развојот ќе биде насочен кон зелени технологии, минимизација на токсични реагенси и максимална енергетска ефикасност.

Златото останува симбол на човечкиот технолошки напредок и природната хармонија меѓу науката и екологијата.

5.3.10. Современи методи за експлоатација на злато

Современото рударство претставува спој на класичната инженерска технологија и најновите научни достигнувања во геологијата, машинството, информатиката и заштитата на животната средина. За разлика од старите методи, кои се потпираа на рачна работа и ниска ефикасност, денешните системи за експлоатација се автоматизирани, технолошки оптимизирани и еколошки контролирани.

Во зависност од длабочината и морфологијата на рудното тело, современото рударство се дели на површинско (*open pit*) и подземно (*underground*) копање, а во последните децении сè повеќе се применуваат и иновативни пристапи, како: *in-situ leaching*, *bio-mining* и *block caving*.

5.3.10.1. Површинско копање (*Open Pit Mining*)

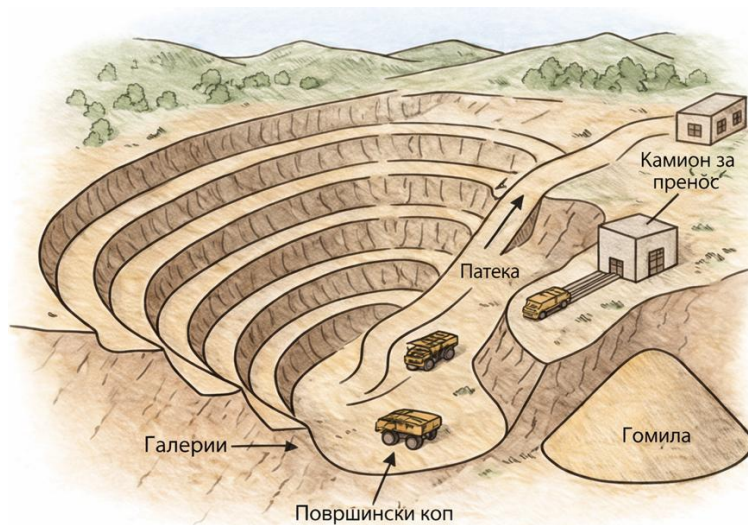
Површинското копање е најраспространет и најекономичен метод за експлоатација на злато кога рудното тело се наоѓа блиску до површината. Се изведува преку серија концентрични тераси (*bench levels*) кои постепено се спуштаат во длабочина.

Процесот започнува со отстранување на покривните слоеви, потоа се изведува дупчење и минирање со контролирани експлозиви за дробење на карпата. Рудата се товари со големи багери и самосвали кои можат да транспортираат над 200 тони по тура до примарни дробилки, каде крупноста се намалува до околу 15 mm.

Современите *open pit* рудници се високо технолошки опремени. Секој чекор од процесот – од дупчење, преку транспорт, до складирање – се следи преку GPS системи, дронави и сензори за геометриска стабилност.

Во најголемите комплекси, како Јанакоча (Перу) или Бодингтон (Австралија), рудникот работи 24 часа дневно, а

целата флота на возила дигитално е поврзана со централна контролна станица.



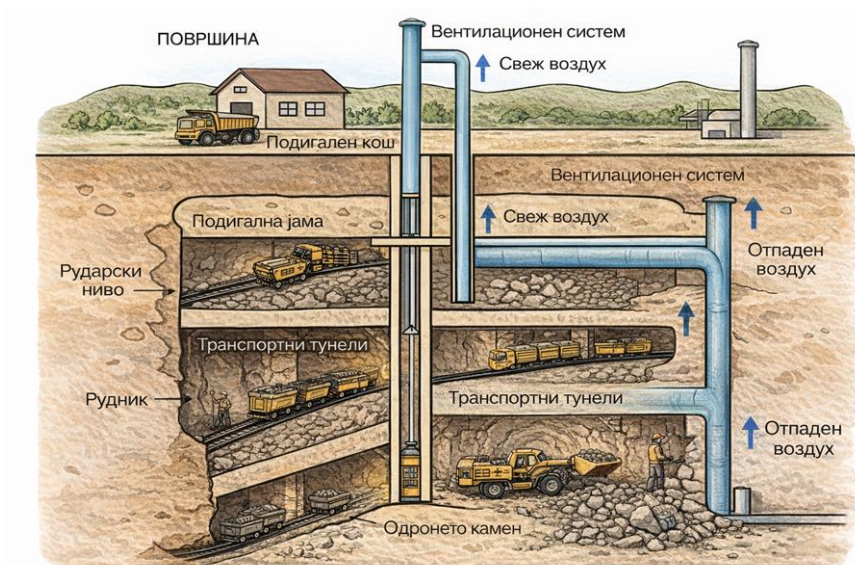
Слика 5.11. ШеКаменецки приказ на *open pit* рудник со тераси, рампи и систем за транспорт

Предностите на површинското копање се неговата едноставност, ниската цена по тон обработена руда и високата продуктивност. Недостатоци се голеКаменеца нарушеност на пејзажот, создавање прашина и бучава, како и потребата од рекултивација на теренот по завршување на експлоатацијата.

5.3.10.2. Подземно копање

Кога рудното тело е длабоко под земјата и површинската експлоатација би била неисплатлива, се применува подземно копање. Овој метод подразбира изградба на систем од вертикални шахти и хоризонтални тунели (галерии) преку кои се пристапува до рудното тело.

Работата под земја е сложена и технолошки бара прецизна координација помеѓу вентилацијата, транспортот и безбедносните системи. Современите подземни рудници користат механизирани дупчалки, транспортни ленти и автоКаменецизирани лифтови, со што се минимизира човечкиот ризик.



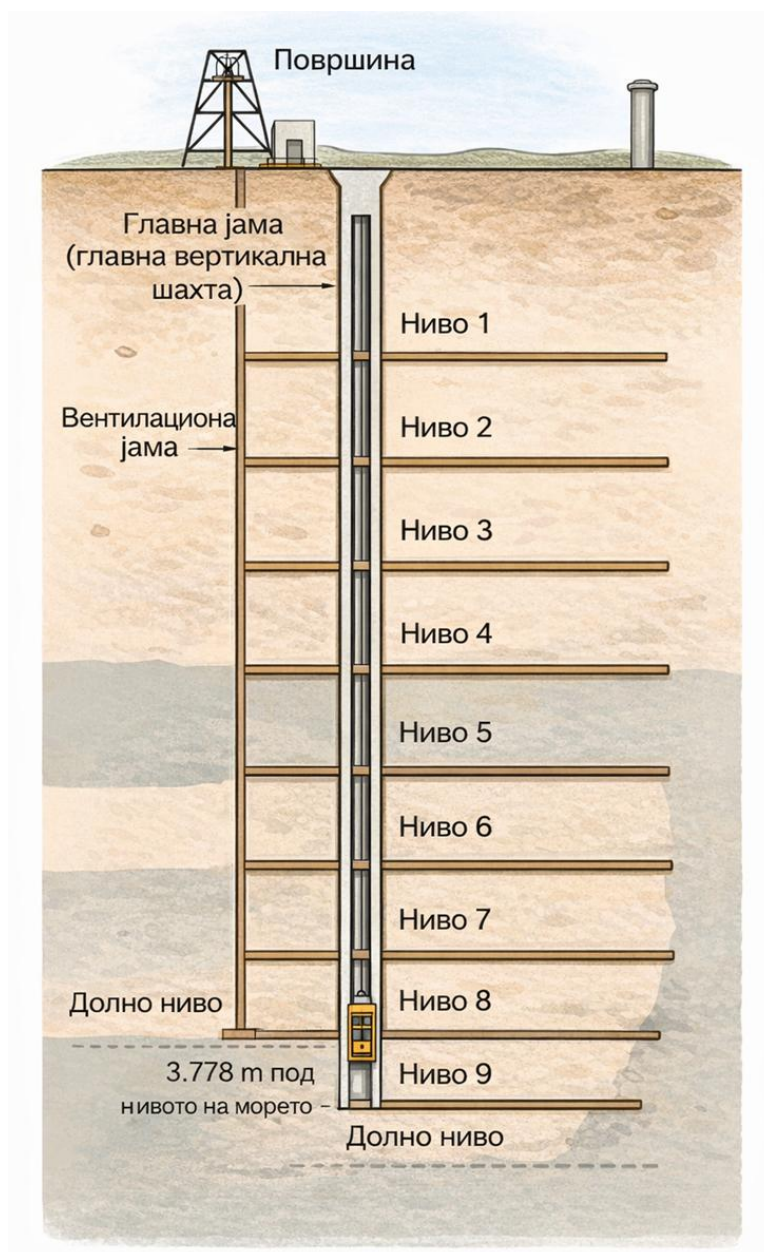
Слика 5.12. Пресек на подземен рудник

Постојат повеќе методи на подземно ископување:

- *Cut and Fill mining* – постепено ископување по хоризонтални слоеви, каде празнините се пополнуваат со отпаден Материјал;
- *Shrinkage stoping* – дел од ископаната руда се остава како потпора;
- *Block caving* – метод при кој големи блокови од карпа се уриваат и слегуваат под сопствена тежина.

Најдлабокиот златен рудник на светот е Мпоненг во Јужна Африка, кој достигнува длабочина од 3778 метри, што е речиси два километри под морското ниво. Температурите таму надминуваат 55 °C, па се користат специјални системи за ладење и вентилација за да се обезбеди безбедна работа. Производството достигнува 250 000 унци злато годишно.

Подземното копање има предност во тоа што минимално го нарушува површинскиот пејзаж, но е технички посложено и бара поголеми инвестиции во безбедносна опрема, контрола на температурата и стабилноста на тунелите.



Слика 5.13. Најдлабокиот златен рудник Мпонег – вертикален пресек со нивоа и шахти

Табела 5.3. Споредба помеѓу површинско и подземно копање

Карактеристика	Површинско копање	Подземно копање
Длабочина на руда	До 500 m	500 – 4000 m
Трошоци по тон	20–40% пониски	Високи поради инфраструктура
Безбедност	Висока	Средна (зависно од условите)
Влијание врз средината	Високо	Ниско
Технолошка сложеност	Ниска	Висока
Животен век на рудник	10–30 години	20–50 години

5.3.11. Современи иновативни методи

Во последните две децении, поради ограничените ресурси и заострените еколошки стандарди, индустријата развива иновативни и одржливи методи на експлоатација, како што се:

- ***In-situ Leaching*** – метод каде реагенсите (обично NaCN или тиосулфат) се инјектираат директно во рудното тело, без физичко ископување. Металот се раствора и се извлекува преку пумпање.
- ***Bio-mining*** – користење микроорганизми (*Thiobacillus ferrooxidans*) за растворање сулфидни минерали и злато. Овој процес е бавен, но еколошки многу побезбеден.
- ***Hydraulic mining*** – примена на воден млаз под висок притисок за раздвојување минерали во меки наслаги.
- **АвтоКаменецизирано рударство и вештачка интелигенција** – воведување сензори, роботи и дронови за мониторинг и контрола на производството.



Слика 5.14. Концепт на одржливо рударство – циркуларен тек на Материјали и вода

5.4. Еколошки аспекти и зелена металургија

Современото рударство е нераскинливо поврзано со концептот на зелена металургија, која претставува интегриран инженерски и научен пристап насочен кон намалување на негативните влијанија врз животната средина, рационално користење на природните ресурси и зголемување на енергетската и Материјалната ефикасност на производствените процеси. Основната цел на зелената металургија е постигнување одржлив баланс помеѓу индустрискиот развој и заштитата на екосистемите, без компромис на технолошките и економските перформанси.

Современите рудници се проектираат и оперираат како комплексни технолошки системи, опремени со интегрирани решенија за:

- собирање и потиснување прашина (суви и влажни системи),
- филтрација и неутрализација на гасовити емисии,
- третман и рециклирање на индустриски и процесни отпадни води,
- повторна употреба на реагенси и процесни раствори,
- контрола и безбедно складирање јаловина и отпаден Материјал.

Во таа насока, во рударско-металуршката индустрија широко се применуваат IPPC директивите (*Integrated Pollution Prevention and Control*) и принципите на *Best Available Techniques* (BAT), кои овозможуваат систеКаменецска контрола и оптимизација на сите фази од животниот циклус на рудникот – почнувајќи од геолошки истражувања и дупчење, преку дробење, мелење и екстракција, па сè до финално складирање, рекултивација и затворање на рудникот.

Современите методи за експлоатација и добивање злато претставуваат висок степен на инженерска прецизност и научна оптимизација. Терасестите *open pit* рудници овозможуваат контролирана експлоатација со минимизирање на ерозијата и

визуелното влијание, додека длабоките подземни копови применуваат напредни системи за вентилација, мониторинг на гасови, геомеханичка стабилност и безбедност на работната средина. Дополнително, автоКаменецизацијата и дигитализацијата овозможуваат далечинско управување, прецизно планирање и намалување на изложеноста на работниците на ризични услови.

Развојот на рударството во 21 век покажува дека преку интеграција на современа технологија, автоКаменецизација, машинско учење и еколошка свест, човекот е способен да управува со минералните ресурси на одржлив, интелигентен и одговорен начин. Златното рударство, како една од најсложените екстрактивни гранки, постепено се трансформира од класична индустриска дејност во цифровизиран, енергетски ефикасен и еколошки оптимизиран процес, кој претставува симбол на современиот индустриски и технолошки развој.

5.5. Прашања и одговори

1. Зошто златото се среќава најчесто во елементарна форма во природата?

Одговор: Поради неговата исклучителна хемиска стабилност и благороден карактер, златото слабо реагира со кислород и други елементи, па најчесто се јавува во елементарна форма или во асоцијација со кварц и сулфидни минерали.

2. Кои се основните фази во современото производство на злато?

Одговор: Експлоатација на рудата, дробење и мелење, физичка и хемиска концентрација, хидрометалуршка екстракција (лужење) и финално рафинирање.

3. На кој принцип се базира гравитационата сепарација на злато?

Одговор: На разликата во густина помеѓу златото ($19,3 \text{ g/cm}^3$) и придружните минерали, при што златото се таложи на дното при испирање со вода.

4. Кои историски уреди се користеле за гравитациона сепарација?

Одговор: Златарска чинија (gold pan) и канали со пречки (sluice boxes).

5. Што претставува амалгимирањето со жива?

Одговор: Процес при кој златото реагира со жива и формира амалгам, кој по загревање ослободува злато по испарување на живата.

6. Кои се главните недостатоци на амалгимирањето?

Одговор: Висока токсичност на живата, сериозни здравствени ризици и значително загадување на животната средина.

7. Каква улога има топењето во историското производство на злато?

Одговор: Топењето овозможува добивање компактно злато и одвојување на нечистотиите преку формирање троска.

8. Што означува раниот хидрометалуршки пристап?

Одговор: Првични обиди за растворање на злато со киселини и солни раствори, кои претставуваат основа за развој на цијанидното лужење.

9. Што претставува цијанидното лужење?

Одговор: Хидрометалуршки процес при кој златото се раствора во раствор на NaCN во присуство на кислород, формирајќи ауоцијаниден комплекс.

10. Напиши ја Elsener реакцијата за растворање на злато.

Одговор: $4\text{Au} + 8\text{NaCN} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{NaAu}(\text{CN})_2 + 4\text{NaOH}$

11. Што е агитирано лужење и кои се неговите карактеристики?

Одговор: Процес при кој мелената руда се меша со NaCN во аерирани резервоари, трае 20–40 часа и обезбедува искористеност од 90–95%.

12. Што претставува хип лужењето (heap leaching)?

Одговор: Хидрометалуршки процес за добивање злато од сиромашни руди, при кој цијаниден раствор се нанесува врз куп од дробена руда.

13. Кои се главните технолошки фази кај heap leaching?

Одговор: Подготовка на рудата, подготовка на подлогата, формирање на куп, нанесување на раствор, лужење, собирање и рециклирање на растворот.

14. Што претставува „бремен раствор“ (pregnant solution)?

Одговор: Раствор богат со растворено злато во форма на $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$, кој се собира на дното на купот.

15. Што е Carbon-in-Pulp (CIP) процес?

Одговор: Процес при кој ауоцијанидните јони се адсорбираат на активен јаглен, по што следи елуција и електролитско издвојување на златото.

16. Кои се типичните работни параметри на цијанидниот процес?

Одговор: NaCN = 0,02–0,05 %, pH = 10,5–11, висина на куп = 6–30 m, време = 60–120 дена.

17. Наведи две предности на хип лужењето.

Одговор: Ниски капитални трошоци и можност за обработка на големи количини сиромашни руди.

18. Наведи два недостатоци на хип лужењето.

Одговор: Долготрајност на процесот и ризик од еколошко загадување со цијаниди.

19. Кои се главните разлики помеѓу површинско и подземно копање?

Одговор: Површинското копање е поевтино и поедноставно, но има поголемо влијание врз животната средина; подземното е посложено, но помалку го нарушува пејзажот.

20. Што претставува зелената металургија во производството на злато?

Одговор: Интегриран пристап кој вклучува рециклирање на раствори, уништување на цијаниди, ВАТ технологии и минимизирање на влијанието врз животната средина.

Поглавје 6 Производство на **СИЛИЦИУМ**

Силициумот (Si) претставува еден од најзначајните елементи во современата наука, индустрија и технологија. Тој е Материјал кој е во основата на современата цивилизација – присутен во речиси секој технолошки производ, од металуршки легури и стакло, до електронски уреди и соларни ќелии. Неговото значење е толку големо што често се вели дека живееме во „ерата на силициумот“, бидејќи токму овој елемент овозможи појава на дигиталната револуција, микрочиповите, компјутерите и телекомуникациските системи.

Во природата, силициумот е еден од најраспространетите елементи – втор по застапеност во Земјината кора по кислородот, со удел од околу 27 % по маса. Се јавува во форма на силициум диоксид (SiO_2) и бројни силикатни минерали, како што се: кварц, фелдспат, оливин, мусковит и други. Во овие минерали, силициумот е хемиски врзан со кислород, формирајќи силни Si–O врски кои му даваат исклучителна стабилност. Овие соединенија се основен градбен елемент на многу видови карпи, песоци и

земјишта, што ја покажува огромната природна распространетост на овој елемент.

Хемиски гледано, силициумот е полуметал (металоид) со специфични својства кои го поставуваат на границата меѓу металите и неметалите. Тој има дијамантска кристална структура, слична на јаглеродот, што му дава висока механичка цврстина и стабилност, но и електрични својства кои може прецизно да се контролираат преку процесот на допирање со елементи, како бор, фосфор или арсен. Токму ова својство – можноста да се менува неговата спроводливост – го прави силициумот основен материјал во полупроводничката индустрија и во производството на микроелектронски компоненти.

Со оглед на својата изобилност и разновидност во примена, силициумот има клучна улога во повеќе гранки на индустријата:

- **Во металургијата**, тој се користи како редуциско средство и легирачки елемент при производство на легури (феросилициум, алуминиум-силициум, магнезиум-силициум и др.), каде што ја подобрува цврстината, отпорноста на корозија и топлинската стабилност.
- **Во хемиската индустрија**, силициумот е основа за производство на силикони (органосиликонски соединенија) кои се користат како еластомери, лепила, заптивки, изолатори и медицински Материјали.
- **Во електрониката**, улогата на силициумот е ненадмината: тој е срцето на сите интегрирани кола, микрочипови, процесори и соларни ќелии, а со тоа и на целокупната дигитална инфраструктура.
- **Во енергетиката**, силициумот претставува основа за развој на обновливи извори преку фотоволтаичните ќелии, кои овозможуваат директна конверзија на сончевата енергија во електрична.

Од технолошки аспект, силициумот е Материјал со извонредна комбинација на физички, хемиски и електронски својства. Неговата точка на топење од 1414 °C, висока отпорност кон оксидација, стабилност на високи температури и можноста за формирање хомогени споеви со други елементи, го прават неопходен во процесите на металуршка редукција, електролиза, рафинирање и кристализација. Современите методи на производство – од електролачни печки до хемиски процеси, како Siemens и Czochralski – овозможуваат добивање различни форми на силициум: металуршки, хемиски чист, полупроводнички и монокристален.

Покрај техничките аспекти, значајно е да се истакне и еколошкото влијание на производството на силициум. Процесите се енергетски интензивни и поврзани со емисија на јаглерод моноксид и јаглерод диоксид. Затоа, современите истражувања се насочени кон „зелени технологии“ – употреба на обновливи извори на енергија, рециклирање на CO гасови, воведување кружна економија и минимизирање на отпадот од силициумска индустрија. Со тоа, силициумот не само што е Материјал на модерната технологија, туку и дел од решението за одржлива иднина.

Конечно, може да се заклучи дека силициумот претставува стратески Материјал кој ја поврзува класичната металургија со високите технологии на 21 век. Тој е присутен во сите нивоа на технолошкиот напредок – од суровински процеси и металуршки производи, до наноструктурирани материјали и интелигентни системи. Поради тоа, проучувањето на неговите својства, процесите на добивање и преработка, како и можностите за примена, претставува основна научна и индустриска цел во современото инженерство на материјали.

6.1. Физички и хемиски својства на силициум

Силициумот (Si) е полуметал со сиво-метален сјај, со исклучително значајни физички и хемиски својства кои го прават еден од најупотребуваните елементи во современата наука и индустрија. Тој има изглед сличен на метал, но неговите електронски својства се карактеристични за полупроводници, што значи дека може да ја менува својата спроводливост под одредени услови – со температура, осветлување или со додавање мали количини на други елементи (допанти). Оваа способност е основата на сите електронски и фотоволтаични апликации на силициумот.

6.1.1. Физички својства

Силициумот е тврдо и кршливо тело со метален сјај, чија кристална структура е од типот дијамантска решетка (sp^3 хибридизација). Секој атом на силициум е поврзан со четири други атоми преку ковалентни врски, формирајќи тетраедарна мрежа со висока симетрија и стабилност. Оваа тридимензионална структура му дава голема цврстина, но и кршливост при механички удар.

Силициумот има густина од $2,33 \text{ g/cm}^3$ при собна температура, точка на топење од $1414 \text{ }^\circ\text{C}$, и точка на вриење од $3265 \text{ }^\circ\text{C}$. Овие високи температури на топење и вриење се резултат на силните ковалентни врски во решетката, што го прави силициумот исклучително стабилен на високи температури и погоден за примена во високотемпературни процеси.

Неговиот топлински коефициент на експанзија е релативно мал, што значи дека силициумот покажува добра димензионална стабилност при температурни промени – својство многу важно при производство на микрочипови, каде што термичкото ширење може да предизвика деформации.

Топлинската спроводливост на силициумот е приближно $150 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ и е повисока од онаа на многу други неметални Материјали. Затоа, силициумот често се користи и како

топлински спроводник во електронските компоненти, каде што се јавува прегревање.

Со оптички аспекти, силициумот е полупроводник во инфрацрвениот опсег и апсорбира светлина во блискиот ултравиолетов и видлив спектар. Оваа комбинација на оптичка апсорпција и контролирана спроводливост го прави идеален за фотоволтаични уреди и фотосензори.

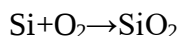
На собна температура силициумот е добар полупроводник, но со зголемување на температурата неговата електрична спроводливост се зголемува експоненцијално. Ова однесување е спротивно на металите и произлегува од фактот што, при повисоки температури, се зголемува бројот на електрони кои ја напуштаат валентната зона и преминуваат во спроводна зона.

Електронската структура на силициумот е $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$, што значи дека во надворешниот (валентен) слој има четири електрони – токму оние што учествуваат во формирањето на ковалентните врски.

6.1.2. Хемиски својства

Хемиски гледано, силициумот е релативно инертен елемент при собна температура. Не реагира лесно со кислород или вода, а површината му е покриена со тенок заштитен слој од силициум диоксид (SiO_2) кој спречува понатамошна оксидација. Овој природен оксиден филм е клучен за многу технолошки апликации, бидејќи овозможува изолација помеѓу електронските компоненти и ја подобрува нивната стабилност.

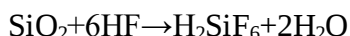
На високи температури (над $900\text{ }^\circ\text{C}$), силициумот реагира со кислород и се оксидира во силициум диоксид:



Оваа реакција е егзотермична и е основа за процесите на оксидација во микроелектрониката.

Силициумот не реагира со повеќето киселини, но флуороводородната киселина (HF) претставува исклучок. HF

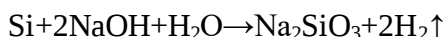
реагира со SiO_2 , растворувајќи го заштитниот оксиден слој и формирајќи тетра-флуоросиликатни комплекси (H_2SiF_6):



Ова својство се користи при правење силициумски површини во полупроводничката индустрија, каде што е потребно контролирано отстранување на оксидните филмови.

Силициумот реагира со халогени (Cl_2 , Br_2 , I_2) при умерени температури и формира тетра-халиди (SiCl_4), кои се лесно испарливи соединенија. Овие реакции имаат големо значење во хемиската преработка, бидејќи SiCl_4 и SiHCl_3 се меѓупроизводи при добивање високочист силициум во Siemens процесот.

Со алкалии, силициумот реагира на високи температури формирајќи силикати и водород:



Оваа реакција е значајна во лабораториските и технолошките процеси каде што се врши контролирано растворање на силициум за подготовка на силикатни раствори.

Во природни услови, силициумот покажува голема хемиска стабилност и отпорност кон корозија, што го прави траен и безбеден Материјал во различни средини. Ова својство е особено важно во биомедицински апликации и нанотехнологии, каде што силициумските наночестички се користат за биосензори, импланти и системи за испорака на лекови.

6.1.3. Комбинирани својства и технолошко значење

Комбинацијата на неговата механичка стабилност, топлинска отпорност, контролирана електрична спроводливост и хемиска инертност го прават силициумот уникатен материјал со широка технолошка применливост. Тој истовремено може да биде структурен материјал во инженерството на керамика и стакло, но и функционален материјал во микроелектроника и нанонаука.

Во контекст на индустриските технологии, силициумот претставува мост меѓу класичните материјали (како металите и

керамиките) и новите генерации на интелигентни материјали, кои комбинираат повеќе физички и хемиски својства за да извршуваат специфични функции. Токму затоа, неговото проучување не е ограничено само на основната хемија и физика, туку и на применетите технологии – од високотемпературна металургија, преку електрохемиски процеси, до нанофабрикација и површинско инженерство.

6.2. Суровини и термодинамичка основа

Производството на силициум започнува со избор на соодветни суровини и разбирање на термодинамичките принципи што ја управуваат редукцијата на силициум диоксидот (SiO_2). Овие два аспекта се тесно поврзани, бидејќи чистотата, физичките својства и гранулометријата на суровината имаат директно влијание врз ефикасноста на процесот, потрошувачката на енергија и квалитетот на крајниот производ.

6.2.1. Главни суровини

Основна суровина за добивање силициум е кварцниот песок или кварцитот, чиј главен состав е силициум диоксид (SiO_2) со чистота најчесто над 98 %. Кварцитот се формира како резултат на метаморфизам на кварцниот песок и претставува густ, компактен материјал со висока механичка цврстина и термичка стабилност.

Покрај кварцот, во процесот може да се користат и други извори на SiO_2 – како дијатомит, фузиран силициум диоксид, речен песок со висока чистота, или вулкански туфови богати со силикатни минерали. Меѓутоа, за индустриско производство на металуршки силициум кварцитот е најпожелна суровина, бидејќи има висока термичка отпорност и минимални нечистотии, како Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_2 и CaO , кои можат да влијаат врз составот на троската и чистотата на добиениот силициум.

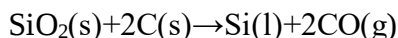
Како редукциони агенси се користат јаглородни материјали – најчесто дрвен јаглен, коксов прашок, антрацит или графит. Тие обезбедуваат потребен јаглород за редукција на SiO_2 до елементарен силициум, но истовремено служат и како енергетски извор при електричното лачење во печката. При изборот на јаглородниот материјал се внимава на неговата реактивност, содржината на пепел и влажен дел, како и на порозноста и гранулацијата, бидејќи овие фактори ја определуваат брзината на редукцијата и степенот на загревање во реакционата зона.

Во смесата понекогаш се додаваат и топители (CaO , CaF_2 , Al_2O_3), кои помагаат во формирањето течна троска и во

врзувањето на нечистотиите. Троската треба да има доволна флуидност за да се оддели лесно од стопениот силициум и да не ја наруши рамнотежата на реакциите во печката.

6.2.2. Термодинамичка основа на редукцијата

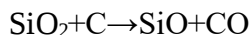
Редукцијата на силициум диоксидот се заснова на неговата реакција со јаглерод при висока температура, при што се добива елементарен силициум и јаглерод моноксид (CO) како гасовит продукт. Основната реакција е следна:



Овој процес е ендотермички, што значи дека бара значително количество топлинска енергија за да се одвива. Затоа, индустриски се користат електролачни печки со потопени електроди, каде што се создава температура од 1900 до 2000 °C. При овие температури, SiO₂ се редуцира преку неколку последователни стадиуми, кои вклучуваат формирање гасовити и цврсти меѓупроизводи.

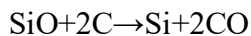
Редукциони стадиуми:

- 1. Прв стадиум:** При околу 1600 °C, кварцот реагира со јаглерод за да формира силициум моноксид (SiO):



Оваа реакција создава гасовита фаза (SiO) која подоцна учествува во дополнителни редукциони процеси.

- 2. Втор стадиум:** На повисоки температури (1800 – 2000 °C), гасот SiO реагира со јаглерод и се редуцира до елементарен силициум:



- 3. Трет стадиум** (реакции на рамнотежа): Во зоната на стопениот силициум, може да се јават и повратни реакции каде што Si реагира со CO гасот, формирајќи SiO гас и повторно затворен циклус. Овој динамичен баланс помеѓу редукција и оксидација е критичен за стабилноста на процесот и зависи од температурата и парцијалниот притисок на CO.

6.2.3. Енергетски и кинетички аспекти

Редукцијата на SiO_2 е контролирана од повеќе фактори:

- Температурата – мора да биде доволно висока за да ја надмине енергетската бариера на реакцијата.
- Гасната дифузија – CO и SiO гасовите треба да се ослободат од реакционата зона без создавање турбуленции.
- Контактната површина – што е поголема површината на контакт меѓу кварцните и јаглородните зрна, толку побрза е редукцијата.

Во индустриски услови реакциите се одвиваат во реакционен слој од 20 до 50 см, каде што температурата, електричната енергија и движењето на гасовите се вникане целно регулирани за да се обезбеди стабилно производство.

6.2.4. Хемиска рамнотежа и термодинамичка анализа

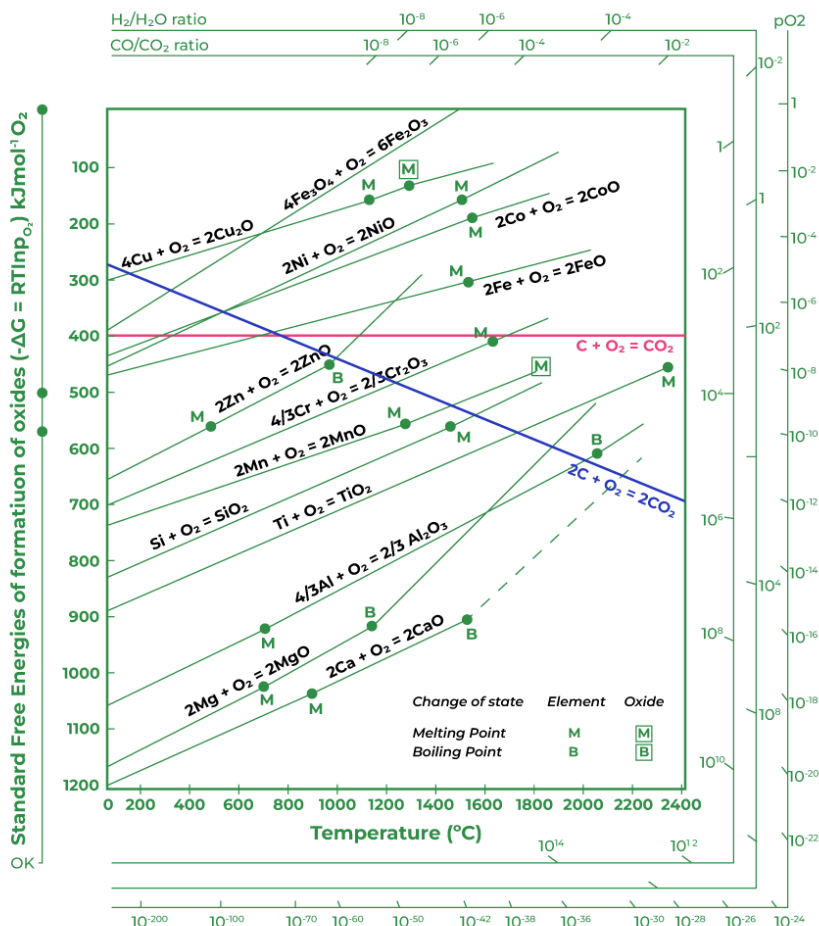
Од термодинамичка гледна точка, реакцијата на редукција на SiO_2 со јаглород е фаворизирана на високи температури поради позитивната промена на ентропијата ($\Delta S > 0$) и големото ослободување на гасовити производи (CO).

Промената на Гибсовата енергија (ΔG) за реакцијата:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

станува негативна над приближно 1700 °C, што значи дека процесот станува спонтан и може да тече со висока брзина.

Графичките прикази на рамнотежите, како дијаграмот на Елингхам (*Ellingham Diagram*), јасно покажуваат дека редукцијата на SiO_2 бара поголема температура отколку за Fe_2O_3 , MnO или Al_2O_3 , што укажува на стабилноста на силикатите и потребата од големи енергетски влезови.



Слика 6.1. Elingham дијаграм

6.2.5. Влијание на нечистотиите

Нечистотиите во кварцот, особено Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO и TiO_2 , можат да реагираат со силициумот и да формираат непожелни силикатни и феросилициумски фази, кои го намалуваат приносот и чистотата на производот. Затоа, суровините предвреме се подготвуваат и се калцинираат за да се отстранат влагата и лесно испарливите компоненти. Се спроведува и гранулометриска селекција, со цел да се постигне оптимален однос на реактивни површини меѓу SiO_2 и C .

Производството на силициум е засновано на јасно дефинирани термодинамички принципи и строго контролирани параметри на суровините. Разбирањето на рамнотежата меѓу SiO_2 , SiO и CO гасовите, како и контролата на температурата и составот на смесата, се клучни за постигнување висока ефикасност и чистота на добиениот силициум. Овие основи ја претставуваат научната подлога врз која се развиваат модерните енергетски и еколошки оптимизирани процеси во индустриското производство на овој стратегиски Материјал.

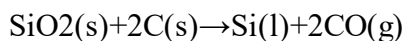
6.3. Производство на металуршки силициум

Производството на металуршки силициум (МГ-Si) претставува основен индустриски процес за добивање елементарен силициум со чистота од 98 до 99,9 %. Овој Материјал претставува основа за понатамошна преработка и за производство на легури (феросилициум, алуминиум-силициум), како и за синтеза на хемиски и електронски чист силициум. Производството е високоенергетски процес кој бара континуирана контрола на температурата, составот на троската и електричната енергија.

6.3.1. Технолошки принципи

Процесот на производство на металуршки силициум се заснова на карботермичка редукција на SiO_2 со јаглерод, при што реакцијата се одвива во електролачна печка со потопени електроди. Овие печки работат со моќност од 15 до 30 MW и обезбедуваат температури повисоки од 1900 °C, потребни за стопување и редукција на кварцот.

Главната реакција е:

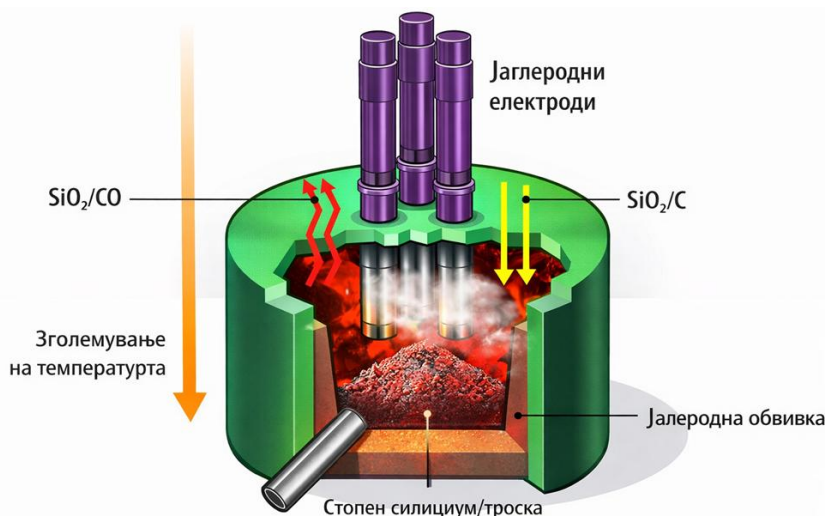


Процесот е ендотермички, што значи дека е потребна голема количина на електрична енергија за негово одржување. Во реални услови, реакцијата не се одвива директно, туку преку низа меѓуфази и реакции со гасовити соединенија, како $\text{SiO}(\text{g})$, при што дел од силициумот се пренесува во гасна форма и повторно се кондензира во долните делови на печката. Овој внатрешен циклус на SiO ја зголемува ефикасноста на редукцијата.

6.3.2. Конструкција и работа на електролачната печка

Електролачната печка за силициум е вертикално цилиндричен реактор со метално куќиште, обложен со огноотпорен материјал (MgO , Al_2O_3 или SiC) за да издржи екстремни температури. Во неа се вградуваат три големи јаглеродни електроди кои продираат во реакционата зона и

создаваат електрично лачење меѓу електродите и смесата од кварц и јаглерод.



Слика 6.2. Шематски приказ на електролачна печка за производство на силициум

Во горниот дел на печката се наоѓа суровинскиот слој (набиен кварц и јаглерод), кој постепено се загрева одозгора надолу. Средниот дел претставува реакциона зона, каде што се врши редукцијата на SiO_2 , а во долниот дел се наоѓа зона на стопен силициум и троска.

Системот на потопени електроди овозможува рамномерно загревање и директен контакт меѓу електричното лачење и реакционата смеса. Температурата во јадрото на печката достигнува и до $2000\text{ }^\circ\text{C}$, додека на периферијата е помала (околу $1500\text{ }^\circ\text{C}$), што овозможува постепено претворање на кварцот во силициум преку неколку фази на редукција.

6.3.3. Редукциони реакции и гасна динамика

Редукцијата на SiO_2 се одвива низ повеќе последователни реакции, кои создаваат сложена термохемиска рамнотежа меѓу цврсти, течни и гасовити фази:

1. $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{SiO} + \text{CO}$ (прв редукционен стадиум)
2. $\text{SiO} + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$ (втор редукционен стадиум)
3. $\text{SiO}_2 + \text{Si} \rightarrow 2\text{SiO}$ (реакција на гасна фаза во горните зони)

Гасот SiO игра клучна улога како носител на силициум низ печката. Дел од него се издига нагоре и повторно реагира со кварц, што создава внатрешна циркулација на материјалот и подобрување на приносот.

CO гасот, кој се ослободува во големи количини (над 2000 m³ по тон силициум), се собира преку гасоводен систем и може да се користи како енергетско гориво или се согорува во постфилтер системи за да се минимизира влијанието врз животната средина.

6.3.4. Состав и својства на троската

При редукцијата на кварцот, примесите од суровината (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO, MgO) формираат троска со состав приближно 50 – 60 % SiO_2 , 20 – 25 % CaO, 10 – 15 % Al_2O_3 и 5 % MgO.

Оваа троска треба да биде течна и стабилна, за да се одвои од стопениот силициум и да го заштити од повторна оксидација. Премногу висока вискозност или недостаток на топителови може да доведе до акумулација на нечистотии во силициумот.

Контролата на температурата и масовниот сооднос $\text{SiO}_2 : \text{C}$ (приближно 1 : 2,5) е критична за стабилна работа на печката.

6.3.5. Издвојување и ладење на силициумот

Кога редукцијата ќе се заврши, стопениот силициум (температура ~1700 °C) се собира на дното на печката и периодично се испушта во калапи каде што се лади во форма на блокови или инготни.

По ладењето, силициумот се дроби, се класифицира и се складира според чистотата и големината на зрната. Типично, металуршкиот силициум содржи 98 – 99,5 % Si, а остатокот се нечистотии од Fe, Al, Ca и Ti.

Во некои случаи, за намалување на содржината на железо и алуминиум се применува рафинирање со троска или кислородна

продувка, што овозможува подобрување на квалитетот без потреба од хемиско прочистување.

6.3.6. Контрола и параметри на процесот

Клучните параметри при индустриското производство на силициум се:

- Односот SiO_2 : C : топител – кој влијае на составот и чистотата.
- Електричната моќност и напон – определуваат температура на редукцијата.
- Топлинска рамнотежа и отпорност на електродите.
- Времето на престој во печката – влијае на степенот на редукција и чистота.

Современите фабрики применуваат компјутерски системи за мониторинг кои ја контролираат температурата, електричната спроводливост и гасните емисии во реално време. Со ова се обезбедува поголема стабилност, помала потрошувачка на електрична енергија и зголемена продуктивност.

6.3.7. Енергетска ефикасност и еколошки аспекти

Производството на еден тон металуршки силициум бара околу 11 – 13 MWh електрична енергија, што го прави процесот многу енергетски интензивен. Затоа, голем дел од модерните постројки користат рециклирање на CO гасот за предзагревање на суровините или како извор на енергија во други делови на производството.

Еколошки, CO гасовите се прочистуваат во филтер-станции и циклонски сепаратори, при што се собира SiO_2 прашина која може повторно да се искористи во процесот – што ја зголемува ефикасноста и ја намалува отпадната маса.

Производството на металуршки силициум е комплексен процес кој бара висока техничка дисциплина, термодинамичка прецизност и енергетска контрола. Со комбинирање на високотемпературна карботермичка редукција, оптимизирана

конструкција на печката и современи методи за контрола на параметрите, денес се постигнуваат високи приноси и стабилна чистота на производот.

Металуршкиот силициум не само што е основна суровина за понатамошно хемиско и електронско прочистување, туку и клучен Материјал за легури, фотоволтаична технологија и наноМатеријали – со што тој претставува еден од највиталните столбови на современата индустрија.

6.4. Производство на високочист силициум

Производството на високочист (хемиски и електронски) силициум претставува суштински чекор кон добивање Материјал погоден за употреба во полупроводничка индустрија и фотоволтаични системи. Чистотата на овој силициум достигнува вредности од **99,9999 % (6N)**, па сè до **99,9999999 % (9N)**, што значи дека во еден тон материјал има само неколку милиграми нечистотиите. Таквиот степен на чистота е неопходен, бидејќи и минимални концентрации на примеси, како Fe, B, P или Al, можат значително да ги променат електричните својства на Материјалот.

Процесот за добивање високочист силициум се заснова на повеќе последователни хемиски и физички операции, при што најчесто се применуваат *Siemens* процесот и *Czochralski* процесот. Овие методи се развиени во средината на XX век и денес претставуваат индустриски стандарди за производство на полупроводнички и фотоволтаични Материјали.

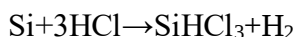
6.4.1. *Siemens* процес

Siemens процесот се базира на хемиска трансформација на металуршкиот силициум (98 – 99 %) во испарливи хлоросилани (SiHCl_3 , SiCl_4), кои потоа се дестилираат и се разложуваат во реактори за добивање високочист елементарен силициум.

Процесот се одвива во неколку клучни фази:

(1) Хлорирање на металуршкиот силициум

Металуршкиот силициум се загрева и реагира со водород хлорид (HCl) при температура околу 300 °C:



Притоа се добива трихлоросилан (SiHCl_3) – испарливо соединение кое содржи и траги од други хлоросилани, како SiCl_4 и SiH_2Cl_2 .

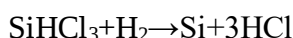
(2) Дестилација и прочистување

Добиената гасовита мешавина се подложува на фракциона дестилација, при што се одвојуваат нечистотиите и се издвојува

чист трихлоросилан. Овој чекор е критичен, бидејќи прочистувањето на SiHCl_3 овозможува елиминирање на метални и хлоридни загадувачи до ниво под 1 ppb (дел на милијарда).

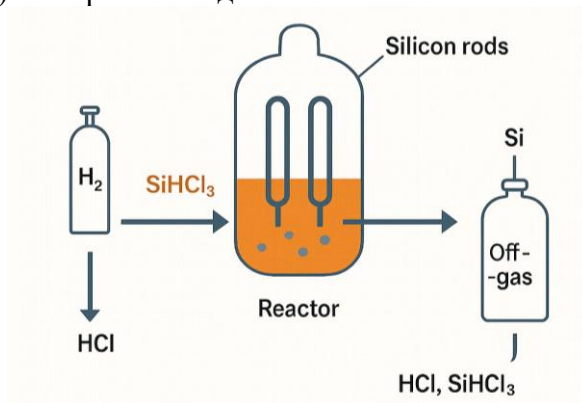
(3) Термичко разложување

Прочистениот трихлоросилан се разложува во вертикални реактори од типот Siemens, во кои се наоѓаат тенки U-обликувани силициумски прачки кои служат како подлога (substrate). Реакцијата се одвива при температура од 1100 до 1150 °C:



Силициумот се депонира на површината на загреаните прачки, при што постепено се формираат цилиндрични монокристални прачки од високочист поликристален силициум.

(4) Собирање и ладење



Слика 6.3. Шематски приказ на Siemens процес за добивање хемиски чист силициум

По завршувањето на процесот (обично 100 – 200 часа), реакторот се лади, а добиениот силициум се демонтира и се дроби на парчиња (*chunk silicon*), кои подоцна се користат како суровина за Czochralski процесот.

Siemens процесот е многу енергетски интензивен, но обезбедува највисока чистота на производот и најголема контрола врз содржината на примеси. Поради тоа, тој е основен метод во производството на соларен и електронски силициум.

6.4.2. *Czochralski* процес (монокристален раст)

Czochralski процесот се користи за добивање монокристален силициум (*single-crystal Si*) од стопена маса на поликристален силициум произведен со *Siemens* методот.

Основниот принцип е контролиран раст на кристал од стопен силициум преку извлекување со ротирачка прачка (*seed crystal*).

(1) Подготовка на стопената маса

Поликристалниот силициум се става во кварцен тигел и се загрева во атмосфера на инертен гас (аргон) до температура околу 1420 °C, при што се добива хомогена стопена смеса. Во неа се додаваат допанти (бор, фосфор или арсен) во мали количини (<0,01 %), со цел да се контролира електричната спроводливост на кристалот.

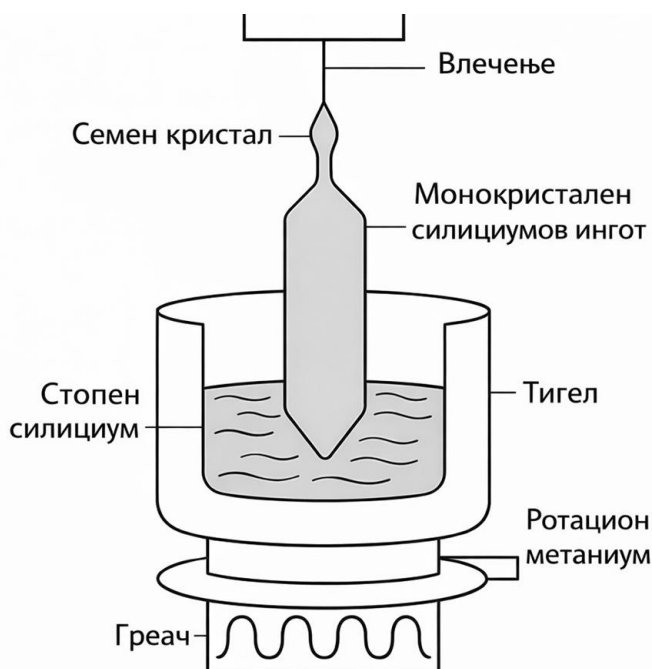
(2) Извлекување на кристалот

Во стопената маса се спушта монокристален зачеток (*seed crystal*) кој почнува да се топи на контактната зона. Со контролирано извлекување и ротирање во спротивни насоки (обично 10 – 20 rpm), се овозможува постепен раст на еден монокристален цилиндар (*ingot*) со должина до 2 метри и дијаметар до 300 mm.

Растот на кристалот се контролира со брзината на извлекување (1 – 3 mm/min) и температурниот градиент, за да се избегне појава на дефекти и да се одржи униформна кристална структура.

(3) Обработка на монокристалот

По завршување на процесот, кристалот се лади, се меле за отстранување на површинските неправилности и се сече на тенки пластови (*wafers*) со дебелина од 0,2 – 0,3 mm. Овие пластови се полираат, се чистат и се подготвуваат за производство на интегрирани кола и соларни ќелии.



Слика 6.4. Шематски приказ на *Czochralski* процесот за израстување на монокристален силициум

6.4.3. Алтернативни и современи методи

Покрај *Siemens* и *Czochralski* методите, современата индустрија применува и *Float-Zone* (FZ) процес, кој се базира на зонско топење без контакт со тигел. Овој метод овозможува уште поголема чистота (до 12N), бидејќи елиминира контаминација од сидовите на тигелот.

Се развиваат и плазмени и хидротермални методи, кои имаат за цел да ја намалат енергетската потрошувачка и да го зголемат приносот на силициум во обновливи енергетски системи.

6.4.4. Еколошки и енергетски аспекти

Производството на високочист силициум е значително поенергетски процес во споредба со металуршката редукција. Поради тоа, современите постројки користат рециклирање на HCl

и SiCl_4 , како и затворени системи на гасна циркулација за да се минимизираат загубите и емисиите.

Во фотоволтаичната индустрија се воведуваат концепти на зелени *Siemens* процеси, каде што дел од топлината и гасовите повторно се искористуваат, со што се постигнува значително намалување на енергетската побарувачка по килограм добиен силициум.

Siemens и *Czochralski* процесите претставуваат столбови на современата технологија за производство на високочист силициум. Првиот овозможува хемиско прочистување до поликристален облик со највисока чистота, додека вториот создава совршен монокристален Материјал погоден за најчувствителните електронски апликации.

Во комбинација, овие методи претставуваат технолошка синергија што овозможува премин од суров, металуршки силициум до високоструктуриран материјал кој ја движи модерната ера на информациските технологии и обновливата енергија.

6.5. Рафинирање и прочистување

По завршување на процесот на производство на металуршки или хемиски силициум, материјалот сè уште содржи мали количини на метални и неметални нечистотии, кои мора да се отстранат за да се добие високочист силициум со чистота поголема од 99,9999 % (6N). Процесите на рафинирање и прочистување претставуваат суштинска фаза во добивањето полупроводнички и фотоволтаични силициум, бидејќи електричните својства на материјалот се екстремно чувствителни дури и на минимални концентрации на примеси.

Главните методи што се применуваат за прочистување се:

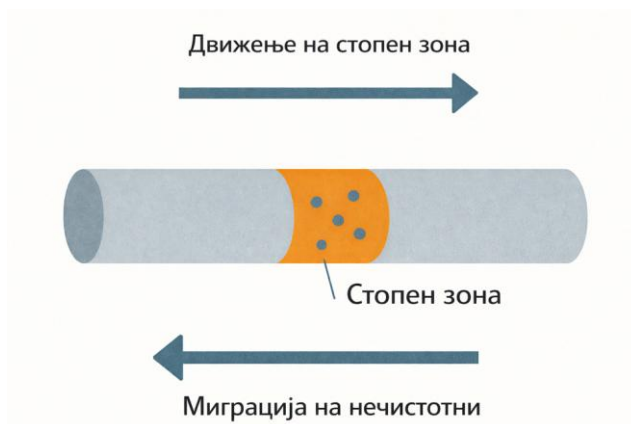
1. Зонско топење (*Zone refining*),
2. Хлоридно прочистување (*Chlorination process*),
3. Плазмено прочистување (*Plasma refining*).

Овие методи се комплементарни – често се користат во комбинација за постигнување на потребната чистота и контрола на структурните карактеристики на Материјалот.

6.5.1. Зонско топење (*Zone refining*)

Зонското топење претставува физичко-термички метод за прочистување, при што нечистотиите се пренесуваат по должината на силициумската прачка со движење на тесна стопена зона. Принципот се заснова на фактот дека повеќето нечистотии имаат поголема растворливост во стопената фаза отколку во цврстата фаза на силициумот.

Процесот се изведува на следниов начин: силициумската прачка се поставува хоризонтално, а над неа се движи индукциски грејач кој создава тесен топлински појас (околу 5 – 10 mm) што ја стопува таа зона. Како што грејачот полека се поместува по должината на прачката, стопената зона ја апсорбира нечистотијата и ја пренесува кон еден крај на материјалот.



Слика 6.5. Принцип на зонско топење: движење на стопена зона и миграција на нечистотии

Зонското топење често се комбинира со *Czochralski* или *Float-Zone* методите на израстување на кристали, каде што дополнително се добива монокристален материјал со минимална содржина на дефекти.

6.5.2. Хлоридно прочистување (*Chlorination refining*)

Во хлоридното прочистување металуршкиот силициум се изложува на реакција со хлор (Cl_2) или водород хлорид (HCl) при високи температури (околу $300 - 400\text{ }^\circ\text{C}$), при што се формираат испарливи хлоросилани (SiCl_4 , SiHCl_3 , SiH_2Cl_2).

Овие соединенија се лесно одделиви од неиспарливите нечистотии преку дестилација, а потоа можат да се разложат повторно во чист силициум. Најважна реакција во овој процес е:



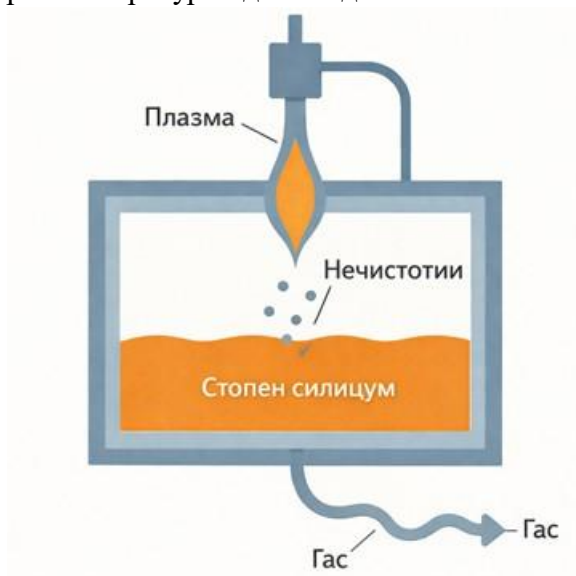
Потоа, преку дестилација, трихлоросиланот се прочистува и се разложува (како во *Siemens* процесот), при што се депонира високочист силициум на подлоги.

Предност на хлоридното прочистување е тоа што овозможува отстранување на метални нечистотии (Fe , Al , Ca , Ti), бидејќи тие не формираат стабилни хлориди под овие услови и остануваат во цврстата фаза.

Овој метод претставува ефикасен хемиски филтер, кој може да го подготви силициумот за следните фази на рафинирање без значителна загуба на Материјал.

6.5.3. Плазмено прочистување (*Plasma refining*)

Плазменото прочистување се користи како современ високотехнолошки метод за елиминирање остатоци од кислород, јаглерод, алуминиум и други тешко отстранливи елементи. Процесот се базира на изложување стопен силициум на аргонска плазма при температури од 2000 до 2500 °C.



Слика 6.6. Шематски приказ на плазмено прочистување на стопен силициум

Плазмата создава јонски ветер кој реагира со нечистотиите и ги претвора во гасовити соединенија (на пр., AlCl_3 , SiO , CO), кои се лесно испарливи и се одведуваат од реакционата зона.

Во некои варијанти, процесот се изведува во вакуумска атмосфера, со што се намалува контаминацијата од кислород и азот. Предноста на плазменото прочистување е во тоа што може да се комбинира со континуирано топење и леење, што овозможува висок степен на автоматизација и енергетска ефикасност.

6.5.4. Комбинирани и напредни техники

Во современата индустрија често се користи комбинација од методи: хлоридно прочистување + зонско топење, или плазмено + зонско прочистување, за да се постигне оптимална чистота и минимални енергетски трошоци.

Во последните години се развиваат и плазма-хидротермални процеси, при кои се комбинираат хемиска и термичка обработка со цел да се намали емисијата на гасови и потрошувачката на електрична енергија. Овие методи се дел од концептот на зелена хемија и одржливо производство на силициум.

6.5.5. Примена на високочист силициум

Прочистениот силициум се користи за:

- Електронска индустрија – производство на микрочипови, диоди, транзистори и интегрирани кола.
- Фотоволтаика – соларни ќелии со висока ефикасност (>20 %) базирани на монокристален или поликристален силициум.
- Нанотехнологија – изработка на силициумски наножици, наночестички и тенки филмови со специфични оптички и спроводни својства.

Рафинирањето и прочистувањето претставуваат клучна завршна фаза во технологијата на силициум. Со комбинирање на физички (зонски), хемиски (хлоридни) и напредни (плазмени) методи се постигнува ниво на чистота кое овозможува користење на силициумот во највисокотехнолошките апликации на денешницата.

Токму преку овие процеси се остварува трансформацијата од индустриски суров материјал во супериорен функционален материјал, кој стои во основата на современата електроника, фотоволтаика и нанонаука.

6.6. Примени на силициум

Силициумот претставува еден од најмултифункционалните Материјали на современата наука и индустрија. Неговите уникатни физички, хемиски и електронски својства овозможуваат примена во широк спектар на области — од традиционална металургија и хемиска индустрија, па сè до најсовремените технологии во електроника, фотоволтаика и наноматеријали. Во продолжение се дадени главните области на примена и нивните технолошки специфики.

6.6.1. Металуршка и легирачка примена

Во металургијата силициумот се користи како легирачки и редуциски елемент.

- Во производството на феросилициум (Fe–Si), силициумот се комбинира со железо во различни соодноси (15 – 90 % Si), формирајќи легура која се користи како редуциско средство при добивање челик и други легури. Феросилициумот ја подобрува еластичноста, јачината и отпорноста на корозија на челикот, а истовремено дејствува како деоксидатор кој ги отстранува растворените кислородни нечистотии.
- Во алуминиумската индустрија силициумот се додава за формирање алуминиум-силициумски легури (Al–Si), познати по својата леснота, отпорност на абразија и одлична ливност. Овие легури се користат за изработка на мотори, клипови, автомобилски и авионски компоненти.
- Во магнезиумовите и бакарните легури силициумот ја подобрува термичката стабилност и отпорноста на оксидација.

Дополнително, во производството на силициумски челици, кои се користат во електрични трансформатори и генератори, додавањето на 3 – 4 % Si ја намалува магнетната загуба и ја зголемува електричната ефикасност.

6.6.2. Примена во електроника и микроелектроника

Најважната и најпозната примена на силициумот е во електронската индустрија. Поради неговата полупроводничка природа, силициумот е основен материјал за изработка на сите интегрирани кола, микрочипови, транзистори и диоди.

Во оваа област се користи монокристален силициум добиен со *Czochralski* или *Float-Zone* процесот, кој има совршена кристална структура и минимална концентрација на дефекти. Со процесот на допирање (вметнување на атоми на бор, фосфор или арсен во решетката), се создаваат p- и n-тип полупроводници, кои се основа за сите електронски компоненти.

Силициумот се применува во:

- транзистори (MOSFET, BJT),
- диоди и тиристори,
- сензори, микропроцесори и мемориски уреди,
- интегрирани кола (IC) и микромеханички системи (MEMS).

Со развојот на нанолитографијата и 3D интеграцијата, силициумот останува незаменлив во микроелектрониката. *Тој е буквално срцето на дигиталната ера – Материјал кој овозможи појава на компјутери, паметни телефони, телекомуникации и Интернетот.*

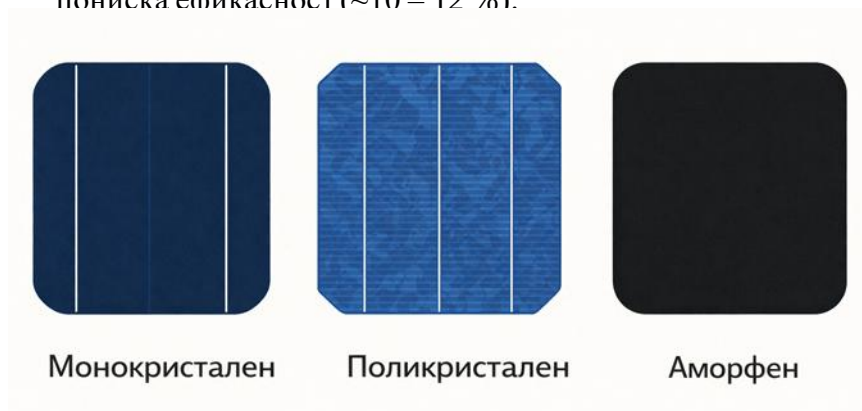
6.6.3. Силициум во фотоволтаика (соларна енергија)

Во последните децении силициумот добива сè поголема важност во обновливите извори на енергија, особено во соларната индустрија.

Над 90 % од светското производство на соларни ќелии се базира на силициумски технологии — поради неговата стабилност, достапност и висока ефикасност при конверзија на светлина во електрична енергија.

Главните типови на силициумски соларни ќелии се:

- Монокристални ќелии – изработени од *Czochralski* кристали, со ефикасност до 25 %;
- Поликристални ќелии – добиени со лиење на стопен силициум во блокови, со ефикасност 18 – 20 %;
- Аморфни (тенкослојни) ќелии – произведени преку хемиска депозиција на тенки филмови од SiH_4 (силициум тетрахидрид) на стаклена подлога, со пониска цена но и пониска ефикасност ($\sim 10 - 12\%$).



Слика 6.7. Типови на силициумски соларни ќелии: монокристална, поликристална и аморфна

Силициумот се применува и во соларни панели од нова генерација, каде што наноструктурирани површини (Si наночестички и наножичи) ја зголемуваат апсорпцијата на сончевата светлина и го подобруваат фотоелектричниот ефект.

6.6.4. Примена во хемиската индустрија

Силициумот и неговите оксиди се основа за бројни хемиски производи со широка примена:

- Силикони (органосиликонски соединенија) – добиени со хидролиза и поликондензација на органохлоросилани. Тие се користат како еластомери, заптивни маси, лепила, изолациони материјали, па дури и во медицински импланти.

- Силикатни стакла и керамики – главна компонента на обичното стакло ($\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}$) и техничките стакла (боросиликатно, кварцно).
- Силикатни бои и заштитни премази – користат силикатни врзиви кои обезбедуваат висока отпорност на топлина, УВ-зраци и корозија.
- Силициум-карбид (SiC) – важен абразивен и конструкциски материјал отпорен на високи температури и механички напрегања.

Во хемиската технологија силициумските соединенија се користат и како катализатори, сорбенти, сушачи и филтри, особено во процесите на прочистување гасови и вода.

6.6.5. Нанотехнологија и напредни материјали

Современата наука отвора нови перспективи за наноструктурираниот силициум, кој има уникатни квантни, оптички и сензорски својства.

- Силициумски наночестички се користат во фотоволтаика, биосензори и медицинска дијагностика, бидејќи покажуваат фотолуминисценција и биокомпатибилност.
- Силициумски наножици (*Si nanowires*) се применуваат во наноелектроника и катализатори, каде што ја зголемуваат активната површина и електронската подвижност.
- SiO_2 наноматеријали (аморфни или порозни структури) служат како носачи на лекови, адсорбенти и термоизолатори.

Во оваа насока, силициумот се наметнува како клучен материјал за следната генерација на интелигентни материјали и наноструктурирани системи.

Примената на силициумот ја опфаќа речиси секоја технолошка гранка на современото општество. Од металургијата и хемијата, преку електрониката и енергетиката, па сè до нанотехнологијата, силициумот се јавува како материјал

што ги поврзува класичните индустрии со високите технологии на иднината.

Неговата висока стабилност, спроводливост, флексибилност во обработка и еколошка одржливост го прават незаменлив во потрагата по нови, интелигентни и енергетски ефикасни материјали.

6.7. Наноструктури на силициум

Со развојот на нанотехнологијата, силициумот доби нова димензија на примена и научен интерес. Наместо само како масивен материјал, тој денес се синтетизира и се проучува во форма на наноструктури – наночестички, наножици, нанотуби, тенки филмови и нанопорозни SiO_2 материјали. Во овие облици, силициумот покажува сосема различни физички, електронски и оптички својства во однос на макроскопскиот кристал. Овие својства произлегуваат од квантните ефекти, големата специфична површина и ограничените димензии (под 100 nm), што ја отвора можноста за примена во повеќе стратешки области: фотоволтаика, оптоелектроника, катализа, биомедицина и сензорски системи.

6.7.1. Видови на наноструктури на силициум

Наноструктурите на силициум се класифицираат според нивната форма, димензии и структура:

1. Наночестички на силициум (*Si nanoparticles*) – сферични честички со големина од 1 до 100 nm, кои можат да бидат аморфни или кристални. Поради квантната конфинементна појава, тие покажуваат фотолуминисценција, т.е. можност да емитуваат светлина во зависност од големината на честичката. Ова ги прави погодни за фотоволтаични и биомедицински апликации.
2. Силициумски наножици (*Si nanowires*) – цилиндрични структури со дијаметар под 50 nm и должина од неколку микрометри. Поради нивната еднодимензионална електронска структура, тие имаат висока електронска подвижност и се применуваат во наноелектроника, сензори и транзистори од нова генерација.



Слика 6.8. Примери на наноструктури на силициум: наночестички, наножици и порозен SiO₂

1. Нанопорозен SiO₂ и композитни наноматеријали – формирани со хемиска оксидација или сол-гел процеси. Овие материјали имаат висока специфична површина (200 – 1000 m²/g) и можат да апсорбираат, да катализираат или да складираат активни супстанции, што ги прави погодни за катализа и биомедицинска употреба.
2. Тенки филмови од силициум и SiO₂ – создадени преку физичка (PVD) или хемиска (CVD) депозиција. Тие се користат како изолациони и заштитни слоеви во микроелектроника, но и како активни слоеви во фотодетектори и сензорски елементи.

6.7.2. Методи за синтеза на наноструктури на силициум

Постојат неколку технолошки пристапи за добивање наноструктуриран силициум:

- Хемиска редукција на силициумски соединенија (SiCl₄, SiH₄) во контролирани услови, при што се добиваат наночестички со дефинирана големина и форма.
- Плазмена синтеза, каде што аргон или водородна плазма иницира разложување на гасовити прекурсори и нуклеација на наночестички.

- Електрохемиски гравирање (*etching*) на монокристален силициум со HF раствор за добивање порозни или наноперфорирани површини.
- Сол-гел метод – процес на хидролиза и кондензација на силикатни прекурсори, кој овозможува добивање на SiO₂ наноматеријали и композити со органски материјали.
- Ласерска аблација или механохемиска синтеза, користени за производство на наночестички со многу мала големина (1 – 10 nm) и висока чистота.

Контролата на температурата, концентрацијата на прекурсори и времето на нуклеација овозможува прецизно приспособување на морфологијата и големината на наноструктурите – што е суштински параметар за нивните оптички и електронски својства.

6.7.3. Својства и предности на наноструктурираниот Si

Во нанодимензии силициумот покажува бројни феномени кои не се присутни кај масивниот материјал:

- Квантна конфинементна појава, која овозможува промена на енергетската забранета зона (*band gap*) со големината на честичките.
- Зголемена фотолуминисценција, што го прави погоден за оптоелектронски и биомедицински апликации.
- Голема специфична површина (до 1000 m²/g) – корисна во катализа, апсорпција и складирање енергија.
- Хемиска реактивност и можност за површинска функционализација, со што се постигнува контролирана биокompatibilност или каталитичка активност.

Овие својства ја прошируваат улогата на силициумот од класичен полупроводник во мултифункционален наноМатеријал.

6.7.4. Примени на наноструктури на силициум

1. Фотоволтаици и енергетика

Наноструктурираниот силициум се користи за изработка на високоефикасни соларни ќелии, каде што наночестичките го зголемуваат апсорпциониот спектар и ја намалуваат рефлексијата. Силициумските наножици служат како транспортери на електрони, зголемувајќи ја фотоелектричната конверзија.

2. Оптоелектроника

Силициумските наночестички покажуваат контролирана емисија на светлина во зависност од нивната големина. Ова се користи за развој на силициумски светлечки диоди (Si-LEDs), фотодетектори, инфрацрвени сензори и ласери на чип.



Слика 6.9. Апликации на наноструктуриран силициум во фотоволтаика, биомедицина и сензори

3. Биомедицина

Поради биокompatибилноста и нетоксичноста, наночестичките и нанопорозниот SiO_2 се користат за таргетирана испорака на лекови, биосензори и ткивно инженерство.

Порозниот силициум служи како биораспадлив носач за контролирано ослободување на активни супстанции во организмот.

4. Катализа и животна средина

SiO_2 наноматеријалите се користат како носачи на катализатори (Pt, Pd, TiO_2), бидејќи овозможуваат рамномерна дисперзија на активните компоненти и висока стабилност.

Нанопорозниот силициум е ефикасен адсорбент за гасови и органски загадувачи, како и активна компонента во филтри за прочистување вода и воздух.

5. Наноелектроника и сензори

Силициумските наножици се основа за минијатурни транзистори и гасни сензори, со чувствителност на молекуларно ниво.

Тие овозможуваат минијатуризација на електронските уреди и развој на чипови од следната генерација.

Наноструктурираниот силициум претставува мост меѓу традиционалната полупроводничка технологија и новата ера на нанонаука и напредни Материјали. Благодарение на своите приспособливи оптички, електронски и биолошки својства, тој најде место во низа иновативни технологии – од соларни ќелии со зголемена ефикасност, преку биосензори и каталитички системи, до наноелектронски уреди со атомска прецизност.

Со континуираниот развој на техники за синтеза и функционализација, силициумските наноструктури претставуваат иднина на одржливата технологија и интелигентните материјали, што дополнително го потврдува статусот на силициумот како еден од најважните елементи на 21 век.

6.8. Еколошки аспекти и зелени технологии

Производството на силициум, особено во неговите металуршки и хемиски форми, е еден од најенергетски интензивните процеси во современата индустрија. За добивање на еден тон металуршки силициум се потребни во просек 11 – 13 MWh електрична енергија, како и значителни количини јаглеродни материјали за редукција. Освен високата потрошувачка на енергија, процесот создава и значителни емисии на јаглерод моноксид (CO) и јаглерод диоксид (CO₂), кои придонесуваат кон ефектот на стаклена градина.

Современите истражувања и индустриски практики се насочени кон развој на зелени технологии и одржливи методи на производство, со цел да се минимизира влијанието врз животната средина и истовремено да се зголеми ефикасноста на процесите.

6.8.1. Енергетска ефикасност и оптимизација на процесите

Една од главните цели на зелената металургија е намалување на потрошувачката на електрична енергија при редукцијата на SiO₂. Тоа се постигнува преку:

- Оптимизација на електролачните печки, со подобро ладење на електродите, контролирана зона на топење и намалени топлински загуби.
- Примена на нови изолациски материјали и рефрактерни облоги кои го намалуваат топлинскиот топител кон околината.
- Рециклирање на топлината од гасовите и троската за предзагревање на суровините.

Во најсовремените постројки енергетската ефикасност е зголемена за 15 – 20 % преку системи за автоКаменецска регулација и термичка реупотреба на отпадните гасови.

6.8.2. Намалување на емисиите на CO и CO₂

При редукцијата на SiO₂ со јаглерод се ослободува голема количина на CO гас (над 2000 m³ на тон силициум), кој во

традиционалните системи се согорува во атмосферата. Современите технологии овозможуваат:

- собирање и рециклирање на CO за употреба како енергетско гориво во други делови од производството,
- конверзија на CO во CO₂ и последователна апсорпција преку карбонатни филтри или амински раствори,
- електрохемиско повторно искористување на CO₂ за добивање јаглородни наноматеријали или органски соединенија.

Овие системи значително го намалуваат јаглородниот отпечаток (*carbon footprint*) на производството и овозможуваат циркуларна употреба на гасовите во рамките на фабричкиот циклус.

6.8.3. Управување со отпад и рециклирање

Производството на силициум создава цврсти, течни и гасовити отпадни продукти, кои мора да се третираат во согласност со еколошките стандарди.

- **Троската** што се создава во процесот на редукција често содржи значителни количини SiO₂ и CaO и може да се рециклира како суровина во градежни Материјали (бетон, изолации, огноотпорни тули).
- **Прашината** што се издвојува од гасовите (SiO₂ микрочестички) се користи како адитив во цементната индустрија или повторно се враќа во процесот.
- **Отпадните гасови** се филтрираат во циклонски сепаратори и електростатски филтри, при што се отстрануваат над 99 % од честичките.

Современите постројки функционираат во рамки на концептот на нула отпад (*zero-waste*), каде што сите нуспроизводи се користат во нови технолошки циклуси.



Слика 6.10. Принцип на затворен еколошки циклус во производството на силициум

6.8.4. Кружна економија и зелена металургија

Модерниот пристап кон еколошката одржливост се темели на принципите на кружната економија (*circular economy*). Наместо линеарниот модел „земи–произведи–фрли“, новиот концепт се стреми кон „земи–произведи–рециклирај–повтори“.

Во индустријата на силициум ова се остварува преку:

- повторна употреба на CO гасовите,
- рециклирање на троската и SiO_2 прашината,
- враќање на технолошката вода во затворен систем,
- употреба на обновливи извори на енергија (соларна, хидро, ветерна) за напојување на електролачните печки.

Со тоа, производството на силициум станува дел од интегрирани зелени индустриски зони, во кои секој нуспроизвод има своја функција во следниот процесен циклус.

6. 8.5. Премин кон обновлива енергија

Голем број современи постројки, особено во Европа и Скандинавија, користат обновливи извори на електрична енергија, како хидроцентрали и ветерни паркови, за напојување на печките. Оваа промена ја намалува зависноста од фосилни горива и ја

прави индустријата за силициум карбон-неутрална во долгорочна перспектива.

Паралелно, во лабораториски и пилот-постројки се испитува можноста за редукција на SiO_2 преку водород наместо јаглерод, при што единствен нуспроизвод е водена пара (H_2O). Овој пристап претставува потенцијална иднина за „зелено производство на силициум“, без емисии на CO_2 .

6.8.6. Интегриран пристап кон одржливо производство

Современите концепти за зелена металургија на силициум се базираат на три клучни принципи:

Енергетска ефикасност и обновливи извори;

Минимална емисија и затворен материјален циклус;

Рециклирање на нуспроизводите и дигитална контрола на процесите.

Овој пристап овозможува намалување на емисиите до 40 %, зголемување на ефикасноста на печките до 90 %, и создавање на индустриски екосистем што е во согласност со директивите на Европската Унија за декарбонизација и одржливо производство (EU Green Deal).

Еколошката одржливост и примената на зелени технологии претставуваат неопходен чекор во понатамошниот развој на индустријата за силициум. Со премин кон обновливи енергетски извори, циркуларна економија и технологии со нулта емисии, производството на силициум се трансформира во еколошки усогласен и енергетски интелигентен процес.

Така, силициумот не само што е материјал на дигиталната ера, туку и клучен елемент во градењето на одржлива, зелена и нискојаглеродна индустриска иднина.

Силициумот претставува стратески материјал во современата индустрија. Од металуршки сировини до наноструктурирани форми, тој ги поврзува металургијата, енергетиката и инфорКаменециката. Развојот на технологиите за

производство и примена на силициум се движи во насока на еколошка одржливост и зголемена чистота.

6.9. Прашања и одговори

1) Што претставува силициумот и зошто се нарекува „Материјал на дигиталната ера“?

Одговор: Силициумот (Si) е металоид и основен полупроводнички материјал за микрочипови, процесори, интегрирани кола и соларни ќелии; затоа се смета за основа на дигиталната револуција.

2) Во каква форма најчесто се јавува силициумот во природата?

Одговор: Најчесто како силициум диоксид (SiO_2) и како силикати во минерали (кварц, фелдспат, оливин, мусковит и др.).

3) Кои се клучните физички својства на силициумот важни за металуршко производство?

Одговор: Висока точка на топење $1414\text{ }^\circ\text{C}$, висока термичка стабилност, дијамантска кристална структура, релативно висока топлинска спроводливост ($\sim 150\text{ W/m}\cdot\text{K}$) и кршливост.

4) Зошто силициумот е полупроводник и како се „контролира“ неговата спроводливост?

Одговор: Поради неговата зонска структура; спроводливоста се контролира со допирање (doping) со B (p-тип) или P/As (n-тип), а влијаат и температурата и осветлување.

5) Зошто силициумот е релативно инертен на собна температура?

Одговор: Бидејќи површината му се пасивира со тенок, заштитен слој SiO_2 , кој ја спречува понатамошната оксидација и реактивност.

6) Напиши ја реакцијата на оксидација на силициум на високи температури.

Одговор: $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$ (егзотермична реакција, особено значајна во микроелектроника).

7) Зошто HF е „специфична“ киселина за силициум/ SiO_2 ?

Одговор: HF го раствора SiO_2 и го отстранува оксидниот слој: $\text{SiO}_2 + 6\text{HF} \rightarrow \text{H}_2\text{SiF}_6 + 2\text{H}_2\text{O}$, што се користи при ецување во полупроводничка технологија.

8) Кои се главните сировини за металуршки силициум?

Одговор: Кварцит/кварцен песок (SiO_2) како основна сировина и јаглеродни редуктанти (кокс, антрацит, дрвен јаглен, графит). По потреба се додаваат топители (CaO , CaF_2 , Al_2O_3).

9) Која е основната карботермичка реакција за добивање силициум?

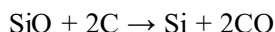
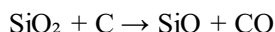
Одговор: $\text{SiO}_2(\text{s}) + 2\text{C}(\text{s}) \rightarrow \text{Si}(\text{l}) + 2\text{CO}(\text{g})$ (ендотермички процес).

10) Зошто процесот се изведува во електролачна печка со потопени електроди?

Одговор: Затоа што е потребна многу висока температура ($\sim 1900\text{--}2000\text{ }^\circ\text{C}$) и голем енергетски внес за редукција на стабилниот SiO_2 .

11) Кои се двата главни „редукциони стадиуми“ преку SiO ?

Одговор:



SiO е клучен меѓупроизвод и „носител“ на Si во гасна фаза.

12) Што е улогата на CO и SiO гасовите во печката?

Одговор: CO е главен гасовит продукт и влијае на гасната динамика и топлината; SiO учествува во циркулација и дополнителна редукција, но може да предизвика и загуби ако излезе без да се редуцира.

13) Што претставува триската и зошто е важна нејзината флуидност?

Одговор: Триската е течна оксидна фаза која ги врзува нечистотиите (Al_2O_3 , CaO , MgO , FeO_x , TiO_2). Добрата флуидност овозможува лесно одвојување од стопениот Si и стабилна работа на печката.

14) Кои нечистотии најмногу го нарушуваат квалитетот на металуршкиот Si и од каде потекнуваат?

Одговор: Fe, Al, Ca, Ti – најчесто потекнуваат од кварцитот и од пепелта/нечистотиите во јаглеродните редуктанти и топителовите.

15) Колкава е типичната чистота на металуршки силициум?

Одговор: Приближно 98–99,9 % Si, зависно од суровини и режим на работа.

16) Кои се клучните параметри што се контролираат во индустриската печка?

Одговор: Однос SiO_2 : C : топител, електрична моќност/напон, положба и трошење на електродите, температура по зони, гасни емисии и време на престој на полнењето.

17) Зошто е потребна термодинамичка анализа ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S$) за редукцијата на SiO_2 ?

Одговор: Бидејќи редукцијата станува термодинамички повољна ($\Delta G < 0$) само на доволно високи температури; Ellingham дијаграмот покажува дека SiO_2 е многу стабилен оксид.

18) Што е Siemens процес и која му е целта?

Одговор: Хемиски процес за добивање високочист поликристален Si: металуршки Si се претвора во испарливи хлоросилани (на пр. SiHCl_3), се прочистува со дестилација и потоа термички се разложува за депозиција на високочист Si.

19) Што е Czochralski процес и каков производ се добива?

Одговор: Процес на израстување монокристал од стопен Si со извлекување на „seed crystal“; се добива монокристален ингот, кој се сече на wafer-и за чипови и соларни ќелии.

20) Кои се главните еколошки предизвици и кои „зелени“ мерки се применуваат?

Одговор: Висока потрошувачка на електрична енергија и емисии на CO/CO_2 + прашина (SiO_2). Мерки: собирање и искористување на CO , филтри/циклон/електрофилтри, рециклирање на прашина, предзагревање на суровини, обновлива електрична енергија и кружна економија (употреба на троска/нуспроизводи).

6.10. ИСПИТНА ЗАДАЧА

Производство на силициум

Тема: Производство на металуршки силициум (MG-Si) во електролачна печка со потопени електрооди: масен биланс (материјален биланс), стехиометрија, гасен тек и поедноставен енергетски биланс + термодинамичка интерпретација (Ellingham).

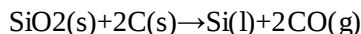
Напомена: Задачата е учебнички/испитен пример со јасни претпоставки. Во реални постројки параметрите се калибрираат со фабрички мерења (P, cosφ, проток на гас, прашина, состав на троска, загуби итн.).

1) ЗАДАЧА (услов)

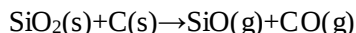
Во електролачна печка (SAF – submerged arc furnace) се произведува металуршки силициум со номинална чистота $w(\text{Si})_p = 99.0$ мас. %.

Производството се заснова на карботермичка редукција на кварцит:

Главна (збирна) реакција:



Во реални услови дел од силициумот се губи како $\text{SiO}(\text{g})$ (испарување/димни гасови), по патот:



Дадено (основа на пресметка)

Планирано е да се произведе $m_p = 1.000 \text{ t}$ производ (MG-Si).

Суровини:

Кварцит: $w(\text{SiO}_2) = 98.5$ мас. %, нечистотии 1.5 мас. % (се смета дека завршуваат во троска).

Редуценси (масен однос 70:30):

Кокс: 88% фиксен C, 10% пепел (ash), 2% влага

Дрвен јаглен: 92% фиксен C, 2% пепел, (влага се занемарува)

Технолошки претпоставки:

Степен на искористување на Si од вкупно редуцираниот Si до производ: $\eta_{Si}=0.85$

(15% од редуцираниот Si се губи како SiO/прашина)

Вишок фиксен јаглерод над стехиометријата: 10%

Додавање топител CaO = 50 kg (целосно оди во троска).

Електрична специфична потрошувачка: 12 MWh/t производ.

Моларни маси (kg/kmol):

Si = 28.085; SiO₂ = 60.084; C = 12.011; CO = 28.010; SiO = 44.084

Моларен волумен на гас на НТП: $V_m=22.414 \text{ m}^3/\text{kmol}$

БАРАЊА

2.1. Пресметајте ја масата на чист Si во производот и потребната количина вкупно редуциран Si.

2.2. Одредете ја потребната маса на **чист SiO₂** и масата на **кварцит**.

2.3. Пресметајте ја потребната маса на фиксен C (со 10% вишок), а потоа и масата на кокс и дрвен јаглен (70:30).

2.4. Пресметајте го CO(g): маса и волумен на НТП. Пресметајте и количина на SiO(g) (маса и волумен).

2.5. Пресметајте троска (приближно) од: нечистотии во кварцит + пепел од редуктантите + CaO.

2.6. Направете табела „влез/излез“ (минимум: кварцит, редуктанти, CaO → производ, троска, CO, SiO, влага).

2.7. Поедноставен енергетски биланс:

Пресметајте електрична енергија во GJ за 1 t производ.

Ако е дадено дека енталпијата на реакција за



пресметајте теоретска топлина за вкупно редуцираниот Si и термодинамичка ефикасност $\eta_Q = Q_{rxn}/E_{el}$.

2.8. Квалитативно објаснете со **Ellingham-пристап** зошто редуцијата на SiO₂ бара многу високи температури (споредба со FeO/MnO).

2.9. Наведете мерки за екологија: CO → согорување/рекуперација, прашина (SiO₂ fume), кружна економија.

3) РЕШЕНИЕ (чекор-по-чекор)

3.1 Масен биланс на производот

Чист Si во производ ($w(\text{Si})_p = 99.0\%$):

$$m_{(\text{Si})p} = 1000 \cdot 0.990 = 990 \text{ kg}$$

Вкупно редуциран Si (со искористување ($\eta_{\text{Si}} = 0.85$):

$$m_{(\text{Si})\text{red}} = \eta_{\text{Si}} m_{(\text{Si})p} = 0.85 \cdot 990 = 1164.706 \text{ kg}$$

Загуба како SiO/прашина:

$$m_{(\text{Si})\text{loss}} = 1164.706 - 990 = 174.706 \text{ kg}$$

3.2 Потребен SiO₂ и кварцит

Однос по моларни маси:

$$m_{(\text{Si})} m_{(\text{SiO}_2)} = 28.08560.084 = 2.1393$$

Чист SiO₂ за редукција:

$$m_{(\text{SiO}_2)\text{pure}} = 1164.706 \cdot 2.1393 = 2491.696 \text{ kg}$$

Кварцит (98.5% SiO₂):

$$m_{\text{qz}} = 0.985 \cdot 2491.696 = 2529.641 \text{ kg}$$

Нечистотии во кварцит (1.5%):

$$m_{\text{imp}} = 2529.641 \cdot 0.015 = 37.945 \text{ kg}$$

3.3 Потребен фиксен C и количини на кокс/јаглен

(a) Стехиометрија со SiO загуби

За Si што завршува во производот: $(\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}) \rightarrow 2 \text{ mol C} / 1 \text{ mol Si}$

За Si што се губи како SiO: $\text{SiO}_2 + \text{C} = \text{SiO} + \text{CO} \rightarrow 1 \text{ mol C} / 1 \text{ mol Si}$

Молови:

$$n(\text{Si})_p = 28.085990 = 35.2495 \text{ kmol}$$

$$n(\text{Si})_{\text{loss}} = 28.085174.706 = 6.2205 \text{ kmol}$$

Потребен C (без вишок):

$$n(\text{C}) = 2n(\text{Si})_p + n(\text{Si})_{\text{loss}} = 2(35.2495) + 6.2205 = 76.7195 \text{ kmol}$$

$$m(\text{C})_{\text{stoich}} = 76.7195 \cdot 12.011 = 921.478 \text{ kg}$$

Со 10% вишок:

$$m(\text{C})_{\text{req}} = 1.10 \cdot 921.478 = 1013.626 \text{ kg}$$

(б) Маса на редуктанти (70% кокс : 30% дрвен јаглен)

Фиксен C во мешавината по 1 kg мешавина:

$$w(C)_{\text{mix}} = 0.7 \cdot 0.88 + 0.3 \cdot 0.92 = 0.892 \text{ Вкупна маса мешавина:}$$

$$m_{\text{mix}} = 0.892 \cdot 1013.626 = 1136.352 \text{ kg}$$

$$\text{кокс: } (m\{\text{coke}\} = 0.70 \cdot 1136.352 = 795.446 \text{ kg}$$

$$\text{дрвен јаглен: } m_c = 0.30 \cdot 1136.352 = 340.906 \text{ kg}$$

Пепел (оди во троска):

$$\text{од кокс: } m = 0.10 \cdot 795.446 = 79.545 \text{ kg}$$

$$\text{од јаглен: } m = 0.02 \cdot 340.906 = 6.818 \text{ kg}$$

$$\text{Вкупно пепел } m = 86.363 \text{ kg}$$

$$\text{Влага од кокс: } m_{H_2O} = 0.02 \cdot 795.446 = 15.909 \text{ kg}$$

3.4 Гасни продукти: CO и SiO

CO

Од стехиометрија:

$$n(\text{CO}) = 2n(\text{Si})_p + 1n(\text{Si})_{\text{loss}} = 76.7195 \text{ kmol}$$

$$m(\text{CO}) = 76.7195 \cdot 28.010 = 2148.914 \text{ kg}$$

$$V(\text{CO})_{\text{NTP}} = 76.7195 \cdot 22.414 = 1719.591 \text{ m}^3$$

SiO

$$n(\text{SiO}) = n(\text{Si})_{\text{loss}} = 6.2205 \text{ kmol}$$

$$m(\text{SiO}) = 6.2205 \cdot 44.084 = 274.228 \text{ kg}$$

$$V(\text{SiO})_{\text{NTP}} = 6.2205 \cdot 22.414 = 139.426 \text{ m}^3$$

3.5 Троска (приближно)

Троска = нечистотии од кварцит + пепел + CaO:

$$m_{\text{troska}} \approx 37.945 + 86.363 + 50 = 174.308 \text{ kg}$$

4) ТАБЕЛА „ВЛЕЗ/ИЗЛЕЗ“ (сумирано)

Табела 1. Материјален биланс за 1 t MG-Si

Тек	Маса (kg)	Забелешка
ВЛЕЗ		
Кварцит	2529.641	98.5% SiO ₂
Кокс	795.446	88% фиксен C, 10% пепел, 2% влага
Дрвен јаглен	340.906	92% фиксен C, 2% пепел
CaO	50.000	топител
ИЗЛЕЗ		
Производ MG-Si	1000.000	w(Si)=99.0%
Троска	174.308	нечистотии+пепел+CaO
CO (гас)	2148.914	1719.6 m ³ на НТП
SiO (гас)	274.228	139.4 m ³ на НТП
Влага (H ₂ O, пареа)	15.909	од кокс

Забелешка: Во реалност ќе има и прашина (SiO₂ fume), мала количина CO₂ од секундарни реакции и загуби во облога/електроди.

5) ЕНЕРГЕТСКИ БИЛАНС (поедноставен)

Електрична енергија:

$$E_{el}=12 \text{ MWh/t} \cdot 3.6 \text{ GJ/MWh}=43.2 \text{ GJ}$$

Теоретска топлина за реакцијата (дадена $\Delta H^\circ = +690 \text{ kJ/mol Si}$, за вкупно редуциран Si):

$$n(\text{Si})_{red}=28.0851164 \cdot 706=41.470 \text{ kmol}$$

$$Q_{rxn}=41.470 \cdot 690 \text{ MJ/kmol}=28614 \text{ MJ}=28.6 \text{ GJ}$$

Термодинамичка „реакциска“ ефикасност:

$$\eta_Q=E_{el}Q_{rxn}=43.2/28.6=0.66 \text{ } (\approx 66\%)$$

Остатокот ($\approx 34\%$) оди на: загревање/топење на суровини, загуби преку облога и ладење, гасови, електрооди, радијација, прашина итн.

6) ТЕРМОДИНАМИКА (Ellingham – квалитативно)

SiO₂ е многу стабилен оксид → линијата за формирање SiO₂ во Ellingham-дијаграм е „длабока“ (многу негативна ΔG°).

За разлика од FeO/MnO , редукцијата на SiO_2 со C/CO станува термодинамички поволна само на многу високи T ($\approx 1900\text{--}2000\text{ }^\circ\text{C}$), каде што членот ($T\Delta S$) станува доминантен и се фаворизираат реакции со создавање гас (CO).

Затоа се користи електролачна печка, а не класична висока печка.

7) ЕКОЛОШКИ И „ЗЕЛЕНИ“ МЕРКИ (кратко)

CO-гас:

Согорување до CO_2 во пост-комора (намалување токсичност) или

Рекуперација/користење на CO како гориво за предзагревање/пареа $\rightarrow$ намалување специфична електрична енергија.

Прашина (SiO_2 fume):

Циклони + филтер-вреќи/електрофилтри $\rightarrow$ собирање микрочестички,

делумно враќање во процес (кружна економија) или индустриска употреба (адитиви).

Троска:

Контролирано ладење и користење во градежни материјали (каде што е дозволено), минимизирање преку чисти суровини и оптимални топители.

9) КРАТКИ ПРАШАЊА ЗА ПРОВЕРКА

1. Зошто редукцијата на SiO_2 бара електролачна печка и $T > 1900\text{ }^\circ\text{C}$?
2. Кој е значењето на меѓупроизводот SiO(g) и како влијае на загубите?
3. Зошто се додава CaO (топител) и што „прави“ со нечистотиите?
4. Како би ја намалиле специфичната енергија (MWh/t) во пракса?
5. Кои системи се користат за фаќање прашина и за управување со CO ?

Кратенки (акроними)

SAF (*Submerged Arc Furnace*) – електролачна печка со потопени електроди.

MG-Si (*Metallurgical Grade Silicon*) – металуршки силициум (типично 98–99.9% Si).

NTP (*Normal Temperature and Pressure*) – нормални услови (стандардни услови за пресметка на волумен на гас).

BAT (*Best Available Techniques*) – најдобри достапни техники (еколошки/инженерски мерки).

m – маса (kg или t).

mp – маса на производ (во задачата: 1.000 t MG-Si).

m(Si)p – маса на чист силициум во производот.

w(Si)p – масен удел (чистота) на Si во производот (мас.%).

m(Si){red} – вкупно редуцирана маса на Si (теоретски добиен Si пред загуби).

m(Si){loss} – загуба на Si (главно како SiO(g) и/или прашина).

w(SiO₂) – масен удел на SiO₂ во кварцитот.

m{qz} – маса на кварцит (quartzite feed).

m(SiO₂)_{pure} – потребна маса на чист SiO₂ (реактивна компонента).

m{imp} – нечистотии во кварцит (не-SiO₂ дел, се смета дека оди во троска).

η{Si} – степен на искористување на Si (колкав дел од редуцираниот Si завршува во производот).

Пример: $\eta_{\text{Si}}=0.85$ значи 85% во производ, 15% загуби.

ηQ – енергетска (термодинамичка) ефикасност во задачата: однос на теоретска реакциска топлина и внесена електрична енергија:

n(X) – количина на супстанција на компонентата X (kmol).

n(Si)p – kmol Si во производ.

n(Si){loss} – kmol Si што се губи како SiO.

n(C) – kmol јаглерод потребен за реакциите.

$n(\text{CO})$, $n(\text{SiO})$ – kmol гасови што се создаваат.

$M(X)$ – моларна маса на супстанцијата X (kg/kmol).

(во задачата се дадени: Si, SiO₂, C, CO, SiO)

V_m – моларен волумен на гас на НТП: 22.414 m³/kmol.

CO(g) – јаглерод моноксид (главен гасен продукт при редукција).

SiO(g) – силициум моноксид (гасовита загуба/меѓупроизвод, критичен за приносот).

H_2O – вода (влага), во задачата главно од кокс (оди во пареа).

$\text{slag} / m\{\text{slag}\}$ – троска (собира нечистотии, пепел и топители).

фиксен C (fixed carbon) – реално активниот јаглерод што учествува во редукцијата.

ash (пепел) – минерален остаток во редуктантите, оди во троска.

влага (moisture) – вода во редуктантите (во задачата значајна кај кокс).

$m\{\text{mix}\}$ – вкупна маса на мешавина од редуктанти.

$m\{\text{coke}\}$ – маса на кокс.

$m\{\text{char}\}$ – маса на дрвен јаглен.

$w(\text{C})\{\text{mix}\}$ – ефективен масен удел на фиксен јаглерод во мешавината (по 1 kg мешавина).

$E\{\text{el}\}$ – внесена електрична енергија (MWh или GJ).

$Q\{\text{rxn}\}$ – теоретска топлина за хемиската реакција (GJ).

ΔH° – стандардна енталпија на реакција (kJ/mol или MJ/kmol).

MWh/t – специфична електрична потрошувачка по тон производ.

GJ/MWh – конверзија: 1 MWh = 3.6 GJ.

Ellingham-дијаграм – график на $\Delta G^\circ(T)$ за оксидациони реакции (квалитативно објаснува стабилност на оксиди).

ΔG° – стандардна Гибсова слободна енергија (термодинамичка „погодност“ на реакцијата).

Поглавје **7** Производство на **ОЛОВО**

7.1. Општ преглед на технолошкиот процес

Производството на олово во индустриски услови претставува класичен пример на екстрактивна металургија базирана на пирометалуршки процеси. Основната цел на технолошкиот процес е трансформација на оловото од минерална форма, најчесто сулфидна, во метална состојба со соодветен степен на чистота, при економично искористување на суровините и енергијата, како и со минимално негативно влијание врз животната средина. За студентите по металургија, производството на олово има посебно образовно значење, бидејќи ги обединува основните принципи на дробење, збогатување, оксидација, редукција, топење и рафинација во еден континуиран технолошки систем.

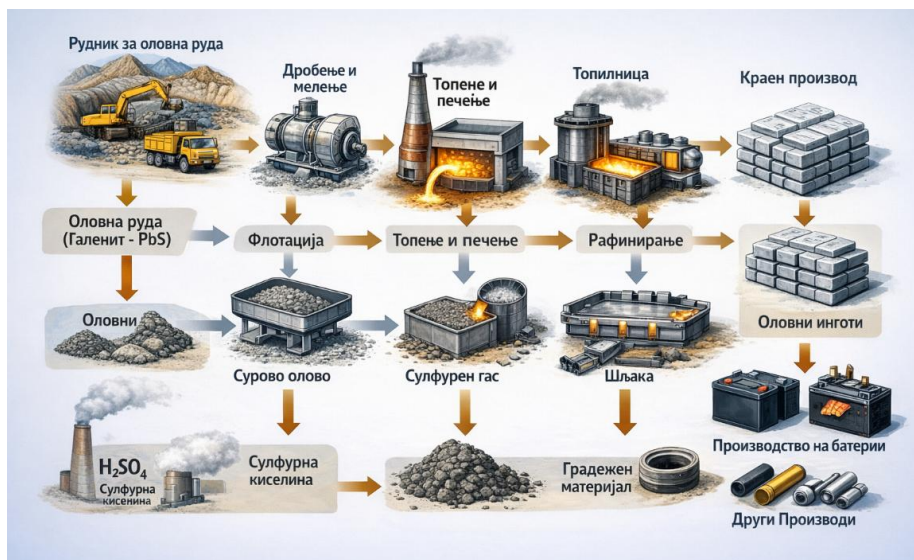
Главната минерална суровина за производство на олово се сулфидните руди, при што галенитот (PbS) е доминантен носител на металот. Во природни услови, галенитот ретко се појавува

самостојно, туку најчесто е асоциран со други сулфидни минерали како сфалерит (ZnS), пирит (FeS_2) и халкопирит (CuFeS_2). Оваа комплексност на рудите условува примената на претходни операции за механичка подготовка и флотациско збогатување, со цел да се добие концентрат со доволно висока содржина на олово погодна за металуршка преработка.

Технолошкиот процес на производство на олово, во својата класична форма, се состои од неколку последователни и меѓусебно поврзани фази, Слика 7.1. Првата фаза е подготовката и збогатувањето на рудата, која опфаќа дробење, мелење и флотација. Во оваа фаза се врши физичко одвојување на корисниот минерал од јаловинските компоненти, при што се добива оловен концентрат со типична содржина од 60 до 70% Pb. Квалитетот на концентратот има директно влијание врз сите последователни операции, па затоа контролата на оваа фаза е од суштинско значење за стабилноста на целиот процес.

Втората фаза е печењето на оловниот концентрат, кое претставува оксидационен термички процес. Основната цел на печењето е трансформација на сулфидното олово (PbS) во оксидна форма (PbO), која е многу попогодна за редукција во следната фаза. При печењето, сулфурот се ослободува во форма на сулфур диоксид (SO_2), што го прави овој чекор критичен и од еколошки аспект. Во современите индустриски постројки, гасовите од печењето не се третираат како отпад, туку како ресурс, бидејќи SO_2 најчесто се насочува кон постројки за производство на сулфурна киселина.

Следната клучна фаза е редукционото топење, при кое оловниот оксид се редуцира до метално олово. Оваа операција традиционално се изведува во високи печки за олово, каде редукцијата се остварува со помош на јаглерод моноксид и јаглерод. Во исто време со редукцијата на оловото, се формира троска која ги врзува железото, силикатните компоненти и другите оксидни примеси. Управувањето со составот и својствата на троската е клучен технолошки аспект, бидејќи од него зависи степенот на загуби на олово и стабилноста на процесот



Слика 7.1. Индустриски тек на сировини за производство на олово

По добивањето на суровото олово, процесот продолжува со фазата на рафинација. Суровото олово содржи различни примеси како бакар, антимон, арсен, калај и бизмут, како и благородни метали. Рафинацијата може да биде пирометалуршка, при што примесите се отстрануваат преку селективна оксидација, или електролитичка, кога се бара многу висок степен на чистота или кога економски е оправдано издвојувањето на сребро и злато. За студентите е важно да се разбере дека рафинацијата не претставува само процес на „прочистување“, туку и фаза во која се валоризираат нуспроизводите со висока економска вредност

Современото производство на олово не може да се разгледува изолирано од системите за заштита на животната средина и управување со отпадните струи. Гасовите, прашината и троската што се создаваат во текот на процесот се предмет на дополнителна технолошка обработка. Прашината богата со олово најчесто се враќа во процесот, додека троската се стабилизира или се користи како секундарна сировина. На овој начин, технолошкиот процес се приближува кон концептот на затворен Материјален циклус.

Покрај примарното производство од руди, значајно место во современата индустрија има и рециклажата на олово, особено од отпадни акумулатори. Во многу земји, секундарното производство веќе учествува со повеќе од половина од вкупното производство на олово. Иако рециклажата често се третира како посебна технологија, од технолошки аспект таа претставува логично продолжение и надополнување на класичниот процес.

Како заклучок, општиот технолошки процес на производство на олово може да се согледа како комплексен, но логички структуриран систем на операции, во кој секоја фаза има јасна улога и влијае врз ефикасноста на целината. Разбирањето на овој општ преглед претставува неопходна основа за подетална анализа на поединечните технолошки чекори, кои ќе бидат обработени во продолжение на поглавјето.

7.2. Суровини за производство на олово

Суровинската база претставува почетна и суштинска алка во технолошкиот процес на производство на олово. Карактеристиките на суровините директно го определуваат изборот на технолошката шема, типот на агрегатите, енергетската потрошувачка, како и квалитетот и приносот на конечниот метал. Во класичното примарно производство, основна суровина се сулфидните руди на олово, додека во современата индустрија сè поголемо значење имаат и секундарните суровини, пред сè отпадните оловни акумулатори.

Најзначаен минерал на олово е галенитот (PbS), кој претставува главен носител на металот и основа за повеќето индустриски технологии. Галенитот се одликува со висока содржина на олово (теоретски околу 86,6% Pb), релативно едноставна кристална структура и поволни физички својства за механичка подготовка и флотациско збогатување. Сепак, во природни услови галенитот ретко се појавува во чиста форма. Најчесто е дел од комплексни сулфидни руди, во кои истовремено се присутни и други метални минерали.

Покрај оловото, оловните руди често содржат значајни количини на цинк, најчесто во форма на сфалерит (ZnS), како и железо во форма на пирит (FeS_2) или пиротин. Присуството на бакар, најчесто како халкопирит, и на благородни метали, особено сребро, е честа појава кај многу оловни лежишта. Овие придружни компоненти имаат двоен ефект врз технолошкиот процес. Од една страна, тие ја зголемуваат сложеноста на збогатувањето и металуршката преработка, а од друга страна, претставуваат потенцијални нуспроизводи со значајна економска вредност.

Во технолошка смисла, присуството на цинк и железо бара внимателно планирање на флотацискиот режим и на составот на троската во фазата на топење. Цинкот, на пример, има тенденција да испарува при високите температури на редукционото топење, што може да доведе до зголемено оптоварување на системите за прочистување на гасови и акумулација на прашина богата со Zn и

Pb. Железото, пак, во форма на оксиди и силикати, директно влијае врз количината и својствата на троската, како и врз редокс рамнотежата во печката.

Табела 7.1 – Типичен хемиски состав на оловен концентрат и технолошко значење на компонентите

Компонента	Типичен опсег	Извор	Технолошко значење
Pb	60–70%	Галенит	Главен метал; дефинира капацитет и биланс
S	15–20%	Сулфиди	Генерира SO ₂ ; влијае врз печење и енергетика
Zn	2–10%	Сфалерит	Делумно испарува; влијае врз прашина/филтри
Fe	2–8%	Пирит/силикати	Влијае врз троска и редокс состојба
SiO ₂	1–6%	Ганг минерали	Киселински топител; регулира троска
Ag	0.02–0.2%	Сулфиди	Важен нуспроизвод;

Во Табела 7.1 е прикажан типичен хемиски состав на оловен концентрат, каков што се користи во класичните пиromеталуршки процеси за производство на олово.

Пред металуршката преработка, рудите се подложуваат на механичка подготовка и флотациско збогатување, при што се добива оловен концентрат. Оловниот концентрат претставува интермедијарна суровина со значително зголемена содржина на Pb и намалена количина на јаловински компоненти. Квалитетот на концентратот е од клучно значење за стабилното водење на процесот на печење и топење. Во индустриска практика, се смета дека концентрат со содржина од 60 до 70% Pb е оптимален

компромис помеѓу степенот на искористување и трошоците за збогатување.

Компонентата „Други“ опфаќа оксиди и сулфиди на железо, цинк, бакар, како и силикатни и карбонатни нечистотии. Од технолошки аспект, особено е важна содржината на сулфур, бидејќи таа директно го определува режимот на печење и количината на SO_2 што ќе се ослободи. Високата содржина на сулфур може да биде поволна од енергетски аспект, но бара соодветни системи за третман на гасовите.

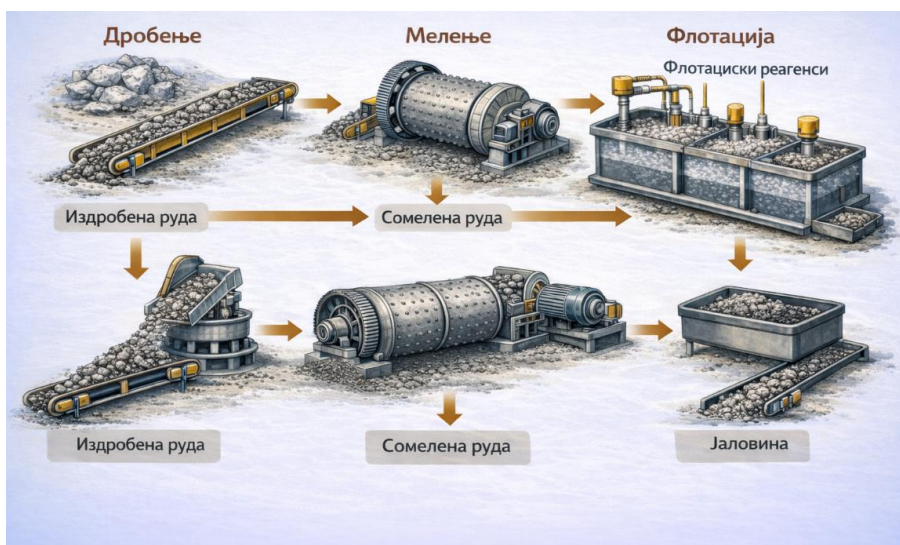
Покрај примарните сировини, современото производство на олово сè повеќе се потпира и на секундарни сировини. Најзначајни меѓу нив се отпадните оловни акумулатори, кои содржат метално олово, оловни оксиди и сулфати. За разлика од примарните руди, секундарните сировини имаат висока содржина на олово, но се придружени со специфични проблеми, како присуство на електролит (сулфурна киселина), пластика и органски материјали. Овие фактори наметнуваат посебни технолошки решенија, но во исто време овозможуваат значително намалување на потребата од примарни рудни ресурси.

За студентите по металургија е важно да се нагласи дека изборот и карактеризацијата на сировините не е само почетна, туку и континуирана активност во технолошкиот процес. Хемискиот состав, гранулометријата, влажноста и минералешките карактеристики на сировините постојано се следат и прилагодуваат, со цел да се обезбеди стабилно и економично производство на олово. Разбирањето на овие аспекти претставува основа за анализа и оптимизација на сите последователни технолошки чекори.

Основна сировина за производство на олово се сулфидните руди, во кои галенитот е носител на металот. Покрај оловото, рудите често содржат цинк, бакар, железо и благородни метали, што влијае врз изборот и сложеноста на технолошкиот процес.

7.3. Подготовка и збогатување на рудата

Подготовката и збогатувањето на рудата претставуваат клучна почетна фаза во технолошкиот процес на производство на олово. Основната цел на оваа фаза е физичко одвојување на корисниот минерал – галенитот – од јаловинските минерали, со што се создава концентрат со доволно висока содржина на Рb погодна за понатамошна пирометалуршка преработка. Успешноста на подготовката и збогатувањето има директно влијание врз ефикасноста на печењето, топењето и рафинацијата, па затоа оваа фаза се смета за темел на целиот технолошки процес, Слика 7.2.



Слика 7.2. Шематски приказ на дробење, мелење и флотација

Подготовката на рудата започнува со операции на дробење и мелење, чија задача е да ја намалат големината на парчињата руда и да овозможат ослободување на галенитот од јаловинските компоненти. Дробењето најчесто се изведува во повеќе степени. Во примарната фаза се користат чељусни или конусни дробилки, со кои крупните парчиња руда се сведуваат на големина погодна за понатамошна обработка. Во секундарното и терциерното дробење се применуваат конусни или ударни дробилки, со цел да

се постигне поконтролиран и порамномерен гранулометриски состав.

На Слика 7.2 е прикажан шематски приказ на основните операции во подготовката и збогатувањето на рудата, почнувајќи од дробењето и мелењето, преку флотацијата, па сè до добивањето на оловен концентрат.



Слика 7.3 Челоусна дробилка



Слика 7.4. Конусна дробилка

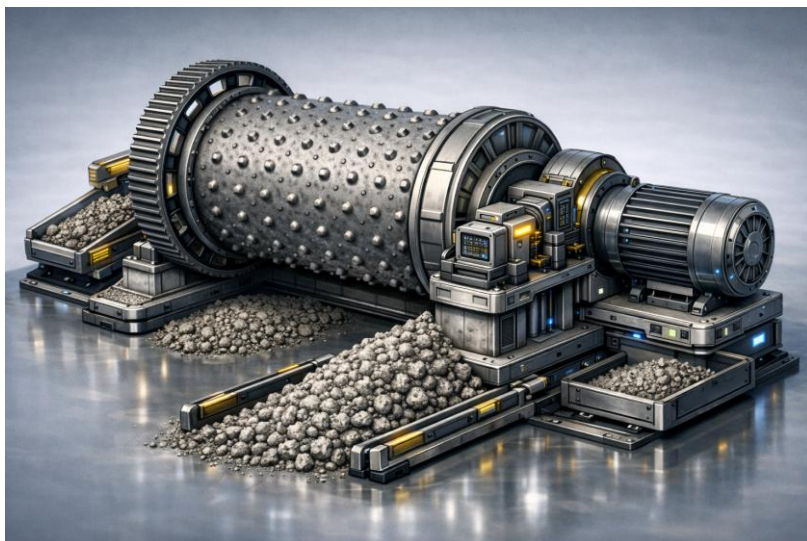
По дробењето следи мелењето, кое претставува поенергетски интензивна операција, Слика 7.5. Мелењето најчесто се изведува во топчести или шипкови мелници, при што рудата се доведува до зрнестост неопходна за ефикасна флотација. Во индустриска практика, мелењето најчесто се организира во затворен циклус со класификатори, што овозможува одвојување на доволно ситниот Материјал од прегрубите честички, кои повторно се враќаат во мелницата. На овој начин се постигнува стабилна гранулометриска распределба и се избегнува непотребна прекумерна потрошувачка на енергија.

Големината на честичките има суштинско значење за понатамошниот процес на флотација. Прегрубото мелење доведува до недоволно ослободување на галенитот, што резултира со ниска ефикасност на збогатувањето, Слика 7.5. Од друга страна, премногу ситното мелење создава фини честички кои тешко се контролираат во флотациските ќелии и можат да предизвикаат зголемено носење на јаловина во концентратот. Затоа, изборот на оптимална зрнестост претставува компромис помеѓу степенот на ослободување и стабилноста на флотацискиот процес.

По мелењето, пулпата се подложува на флотациско збогатување. Флотацијата е физичко-хемиски процес кој се заснова на разликите во површинските својства на минералите. Галенитот релативно лесно се активира со помош на сулфхидрилни колектори, при што неговата површина станува хидрофобна и се прилепува за воздушните меурчиња. На тој начин, галенитот се издигнува на површината на флотациската пулпа и се отстранува во форма на пена, додека јаловинските минерали остануваат во течната фаза.

Во индустриска практика, флотацијата најчесто се организира во повеќе степени, Слик. Прво се изведува т.н. груба флотација, при што се добива концентрат со релативно висока содржина на Pb, но и со присуство на одредени нечистотии. Потоа следуваат операции на чистење и, по потреба, повторно чистење, со кои се подобрува квалитетот на концентратот и се намалува

содржината на јаловински компоненти. При комплексни Pb–Zn руди, се применуваат посебни флотациски режими со депресија или активација на одредени минерали, со цел да се постигне селективно одвојување.



Слика 7.5. Топчеста мелница



Слика 7.6. Флотациски ќелии

Како резултат на флотациското збогатување, се добива оловен концентрат со висока содржина на Pb, кој претставува основна суровина за понатамошната фаза на печење. Паралелно со концентратот, се добива и јаловина, која содржи мала количина на олово и вообичаено се одлага или се користи за други индустриски намени, во зависност од нејзиниот состав.

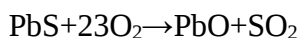
Од наставен аспект, оваа фаза претставува важна можност студентите да ги поврзат знаењата од машинството, физичката хемија и минералната преработка. Разбирањето на подготовката и збогатувањето на рудата е неопходна основа за анализа на сите последователни металуршки операции, бидејќи квалитетот на концентратот во голема мера го одредува успехот на целокупниот технолошки процес на производство на олово.

7.4. Печење на оловниот концентрат

Печењето на оловниот концентрат претставува една од клучните и технолошки најзначајни фази во пирометалуршкото производство на олово. Основната цел на оваа операција е трансформација на оловото од сулфидна форма во оксидна форма, со што се создаваат поволни услови за последователната редукција и топење. Директната редукција на оловните сулфиди е термодинамички и кинетички неповолна, додека оловниот оксид (PbO) се редуира значително полесно и со помали енергетски трошоци. Поради тоа, печењето претставува неопходна подготвителна термичка обработка која во голема мера ја одредува ефикасноста и стабилноста на целиот металуршки процес.

7.4.1. Хемизам на процесот на печење

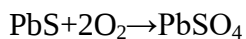
Основата на процесот на печење е оксидацијата на оловниот сулфид (галенит, PbS) со кислород од воздухот. Примарната реакција на оксидација може да се прикаже со следната стехиометриска равенка:



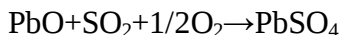
Оваа реакција е екзотермна, што значи дека ослободува значителна количина топлина и овозможува делумно автотермално одвивање на процесот по иницијалното загревање на печката.

Меѓутоа, реалното печење на оловните концентрати е комплексен процес кој опфаќа повеќе паралелни и последователни реакции. Во зависност од температурата, парцијалниот притисок на кислород и концентрацијата на сулфур диоксид во гасната фаза, може да дојде до формирање и на следните соединенија:

Формирање на оловен сулфат:



или секундарно:



Во одредени услови може да се појават и мешани оксидно-сулфатни фази, како и интермедијарни соединенија кои влијаат врз реактивноста на калцинатот. Прекумерното сулфатирање е непожелно, бидејќи PbSO_4 е потешко редуцибилен од PbO и може негативно да влијае врз процесот на топење.

7.4.2. Температурни услови и кинетика на процесот

Печењето на оловниот концентрат во индустриски услови најчесто се изведува во температурен интервал од:

850 до 1000 °C

- **Под 800 °C** – реакциите на оксидација се бавни, а дел од PbS останува нерегирано, што резултира со недоволно оксидиран калцинат.
- **Во интервалот 850–950 °C** – се постигнува оптимална рамнотежа помеѓу оксидацијата на сулфидите и ограничувањето на сулфатирањето; калцинатот има висока реактивност.
- **Над 1000 °C** – постои опасност од синтерување на честичките, зголемено испарување на оловни соединенија и прекумерно формирање на сулфати.

Затоа, изборот на температурниот режим претставува резултат на термодинамичка и кинетичка оптимизација и е од суштинско значење за стабилноста на процесот.

7.4.3. Индустриски агрегати за печење

Во современата индустриска практика, печењето на оловните концентрати најчесто се изведува во:

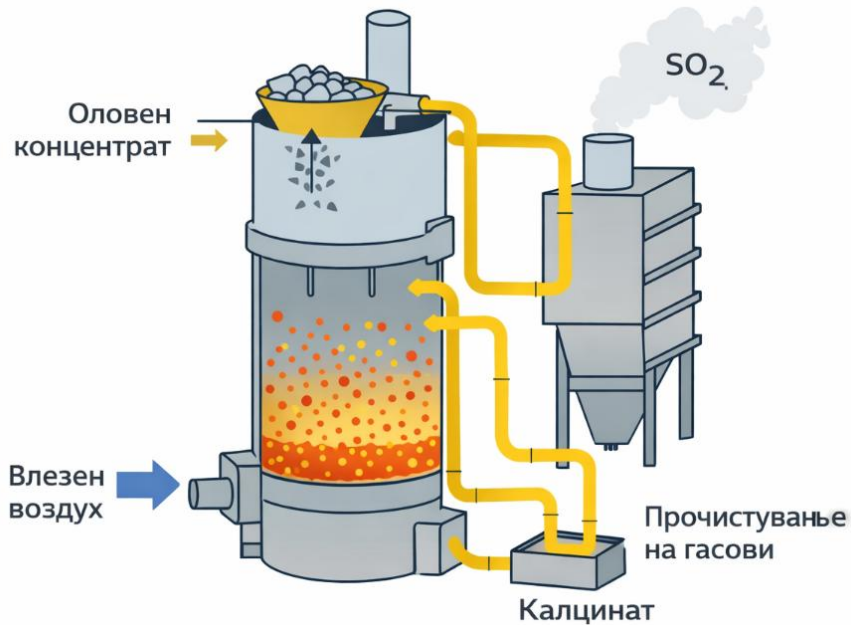
а) Печки со флуидизиран слој

Овие печки се доминантни во современите металуршки постројки, Слика 7.7. Ситнозрнестиот концентрат се одржува во флуидизирана состојба со доток на воздух, што обезбедува:

- интензивен контакт помеѓу цврстата и гасната фаза,

- рамномерна температура во целата реакциона зона,
- висок степен на оксидација за кратко време на задржување.

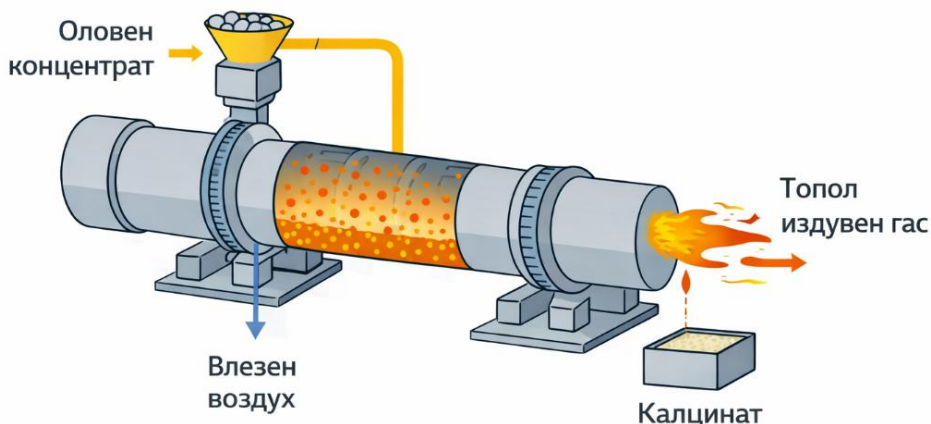
Температурата во флуидизираниот слој најчесто се одржува во опсег од **900–950 °C**.



Слика 7.7. Печка со флуидизиран слој за печење на олово

б) Ротациони печки

Ротационите печки се користат поретко и претежно за концентрати со погруба гранулометрија или повисока влажност. Материјалот се движи низ наклонет ротирачки цилиндричен сад, при што постепено се загрева и оксидира, Слика 7.8. Температурите во овие печки обично се движат во опсег од 850–1000 °C, но контролата на процесот е посложена во споредба со флуидизираниот слој.



Слика 7.8. Ротациона печка за печење на олово

7.4.4. Цели и резултати од печењето

Главните цели на печењето на оловниот концентрат се:

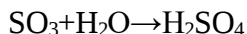
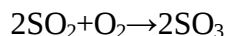
- постигнување висок степен на оксидација на PbS во PbO ,
- добивање калцинат со добра порозност и реактивност,
 - создавање гасна струја богата со SO_2 (6–12 vol.%), погодна за понатамошна преработка,
 - минимизирање на загубите на олово преку прашина и испарливи соединенија.

7.4.5. Еколошки и индустриски аспекти

Сулфур диоксидот кој се ослободува при печењето претставува значаен еколошки проблем доколку не се третира соодветно. Во современите постројки, гасовите од печењето се:

- собираат,
- ладат и прочистуваат од прашина,

- насочуваат кон постројки за производство на сулфурна киселина според реакцијата:



Со ова, печењето на оловниот концентрат станува интегриран процес кој ги поврзува металургијата и хемиската индустрија, обезбедувајќи дополнителна економска и еколошка корист.

7.4.6. Образовно значење

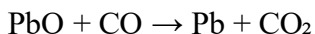
За студентите по металургија, процесот на печење на оловниот концентрат претставува класичен пример за примена на термодинамиката, кинетиката и инженерската контрола на процесите. Разбирањето на влијанието на температурата, гасниот состав и времето на задржување е од суштинско значење за правилно проектирање и управување со современи металуршки постројки.

7.5. Редукционо топење

Редукционото топење претставува централна фаза во пирометалуршкото производство на олово, при што оловниот оксид добиен во процесот на печење се редуцира до метално олово. Оваа операција најчесто се реализира во висока печка за олово, која по својата конструкција и принцип на работа е прилагодена за обработка на оксидни суровини со висока содржина на олово и со значајно присуство на придружни оксиди и сулфиди, Слика 7.9. За студентите по металургија, редукционото топење е клучен пример за практична примена на термодинамиката, кинетиката и инженерството на високи температури.

Суровината што влегува во високата печка е калцинатот добиен со печење на оловниот концентрат, кој главно содржи PbO, но и одредени количини на PbSO₄, Fe₂O₃, SiO₂ и други оксидни компоненти. Заедно со калцинатот, во печката се вчитуваат редукцент (најчесто кокс), како и топители, чија улога е да овозможат формирање троска со соодветен состав и физички својства. Полнежот се внесува континуирано од горниот дел на печката, додека од долниот дел се дува воздух, со што се создава редукциона атмосфера богата со јаглерод моноксид.

Редукционото топење има за цел редукција на PbO до метално олово. Процесот најчесто се изведува во високи печки, каде редукцијата се остварува со јаглерод моноксид и јаглерод.



Покрај оваа реакција, во печката се одвиваат и реакции на директна редукција со јаглерод, како и низа споредни реакции поврзани со оксидите на железо, цинк и други елементи. Како резултат на редукцијата, металното олово се собира во течна состојба на дното на печката, каде формира посебен метален слој (жабица), додека оксидните примеси се врзуваат во троска која лебди над металот.

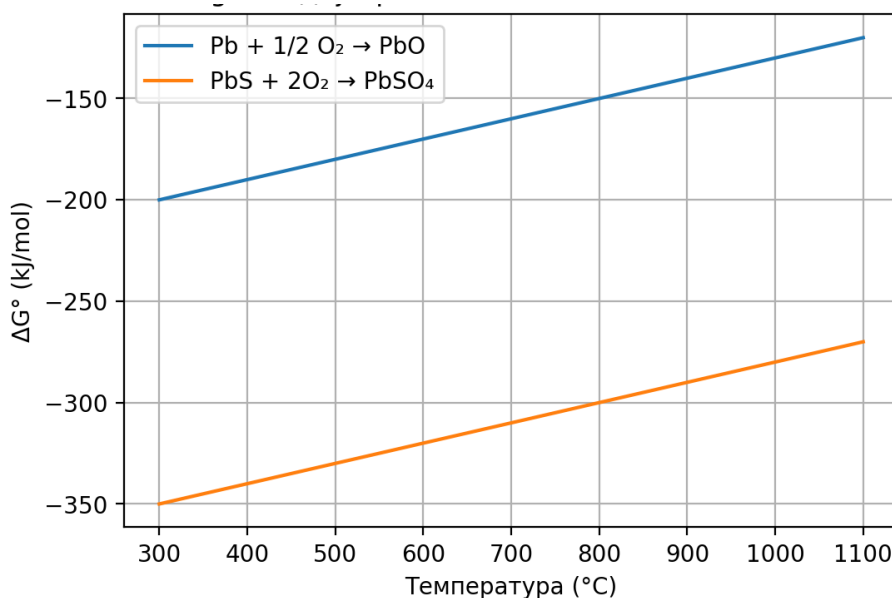


Слика 7.9. Висока печка за производство на олово

Високата печка за олово може да се подели на неколку карактеристични зони. Во горниот дел се одвива предзагревање и делумна редукција на полнежот со помош на топлите гасови што се движат нагоре. Во средниот дел доминира редукцијата на PbO до Pb , додека во долниот дел се одвива топење и акумулација на металот и триската. Разбирањето на овие зони е од особена важност за стабилно водење на процесот и за спречување на појави како задржување на Материјалот, неправилно течење на триската или зголемени загуби на олово.

Формирањето и својствата на триската се еден од најважните технолошки аспекти на редукционото топење. Триската мора да има доволно ниска вискозност за да овозможи лесно одвојување од металот, но истовремено и соодветен

хемиски состав за ефикасно врзување на примесите. Вообичаено, троската е силикатна и содржи CaO, SiO₂ и FeO во определени односи. Неправилен избор на топители или несоодветен редокс режим може да доведе до зголемена растворливост на Pb во троската, што претставува директна загуба на метал.



Слика 7.10. Ellingham-дијаграм (Pb–S–O)

Термодинамичката оправданост на процесите на печење и редукционно топење може јасно да се објасни со помош на Ellingham-дијаграмот за системот Pb–S–O, Слика 7.10. Ellingham-дијаграмот ја прикажува зависноста на промената на стандардната Гибсова енергија (ΔG°) од температурата за реакции на оксидација на металите и сулфидите. Во контекст на производството на олово, овој дијаграм е особено корисен за разбирање зошто печењето и редукцијата се изведуваат токму во одреден температурен интервал.

На Ellingham-дијаграмот, линијата за оксидација на PbS до PbO и SO₂ се наоѓа релативно ниско, што укажува дека оваа реакција е термодинамички поволна во широк температурен опсег. Ова објаснува зошто сулфидниот концентрат лесно се

оксидаира при печење и зошто сулфурот може ефикасно да се отстрани во форма на SO_2 . Истовремено, линијата за оксидација на Pb до PbO покажува дека PbO е релативно нестабилен оксид во споредба со оксидите на железото или силициумот, што значи дека PbO може лесно да се редуцира со CO или јаглерод.

Ellingham-дијаграмот исто така овозможува да се согледа зошто директната редукција на PbS не е технолошки повољна. Иако теоретски е можна, таа бара повисоки температури и создава сложени гасни рамнотежи, додека патот преку оксид ($\text{PbS} \rightarrow \text{PbO} \rightarrow \text{Pb}$) е поефикасен и полесно контролирачки. За студентите, ова е важен пример како термодинамичката анализа директно влијае врз изборот на индустриска технологија.

7.5.1. Индустриски аспекти и контрола на процесот

Во реални индустриски услови, редукционото топење е придружено со формирање на гасови богати со CO и CO_2 , како и со испарување на одредени метали, особено цинкот. Овие гасови мора да се третираат во системи за прочистување, при што прашината богата со Pb често се враќа во процесот. На овој начин, редукционото топење не се разгледува како изолирана операција, туку како дел од интегриран технолошки систем.

Од наставен аспект, редукционото топење во висока печка претставува синтеза на повеќе металуршки дисциплини. Студентите преку овој процес ги поврзуваат знаењата од термодинамика, реакциска кинетика, материјални биланси и инженерство на печки. Разбирањето на улогата на редукцентот, топителите и троската е од суштинско значење за анализа и оптимизација на производството на олово.

Како заклучок, редукционото топење во висока печка е клучната фаза во која се реализира трансформацијата на оксидната форма на оловото во метален производ. Неговата успешност зависи од правилната подготовка на суровината, термодинамичките услови и инженерската контрола на процесот, што го прави овој чекор централна тема во изучувањето на технологијата за производство на олово.

7.6. Рафинација на оловото

Рафинацијата на оловото претставува завршна, но технолошки исклучително значајна фаза во процесот на производство на олово. Основната цел на оваа фаза е отстранување на примесите од суровото олово добиено по редукционото топење, со што се обезбедува метал со строго дефиниран степен на чистота, прилагоден на конкретната индустриска примена. Истовремено, рафинацијата овозможува издвојување и валоризација на придружните метали, особено среброто и златото, што често има значително економско влијание врз целокупната технологија.

Суровото олово („блистер олово“) најчесто содржи примеси како Cu, Sb, As, Sn, Bi, Fe, како и благородни метали (Ag, Au). Видот и концентрацијата на овие примеси зависат од минералотскиот состав на рудата и условите на топење. Во технолошка смисла, рафинацијата не е единечна операција, туку низа селективни процеси кои се базираат на разлики во:

- афинитетот кон кислородот,
- растворливоста во оловото,
- електрохемискиот потенцијал на елементите.

7.6.1. Пирометалуршка рафинација на олово

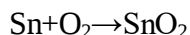
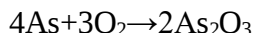
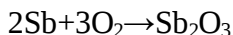
- Основен принцип

Пирометалуршката рафинација се изведува во рафинациски котли или печки при температури 330–400 °C, односно малку над точката на топење на оловото (327 °C). Процесот се заснова на селективна оксидација, при што примесите се оксидираат полесно од оловото и се издвојуваат како осидни дросови.

7.6.1.1. Хемизам на пирометалуршката рафинација

- Оксидација на примесите

Антимон, арсен и калај имаат значително поголем афинитет кон кислородот од оловото:



Формираните оксиди се слабо растворливи во растопеното олово и испливуваат на површината како сурово олово (дрос), кој механички се отстранува.

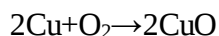
Сурово олово (Pb + примеси)



Слика 7.11. Пирометалуршко рафинирање на олово

7.6.1.2. Однесување на бакарот

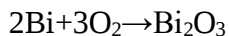
Бакарот има ограничена растворливост во оловото и може да се издвојува како:



или во форма на интерметални фази. Отстранувањето на бакарот обично претставува прва фаза на рафинацијата.

7.6.1.3. Бизмут (технолошки најпроблематична примеса)

Бизмутот има слични физички својства со оловото и слабо се оксидира:



Поради ова, неговото отстранување бара специјални услови или дополнителни процеси, а кај олово со повисоки барања за чистота често се применува електролитичка рафинација.

7.6.2. Електролитичка рафинација на олово

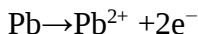
- Основен принцип

Кога се бара олово со многу висока чистота ($\geq 99,99\%$ Pb) или кога суровото олово содржи значајни количини на благородни метали, се применува електролитичка рафинација. Процесот се изведува во електролитички ќелии, при релативно ниски температури (30–50 °C).

- **Анода:** сурово олово
- **Катода:** чисто олово
- **Електролит:** раствор на PbSiF_6 или $\text{Pb}(\text{BF}_4)_2$

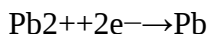
7.6.2.1. Хемизам на електролитичката рафинација

- Анодна реакција



Примесите со пониска благородност (Sb, As, Sn) делумно се раствораат или формираат анодни соединенија.

- Катодна реакција

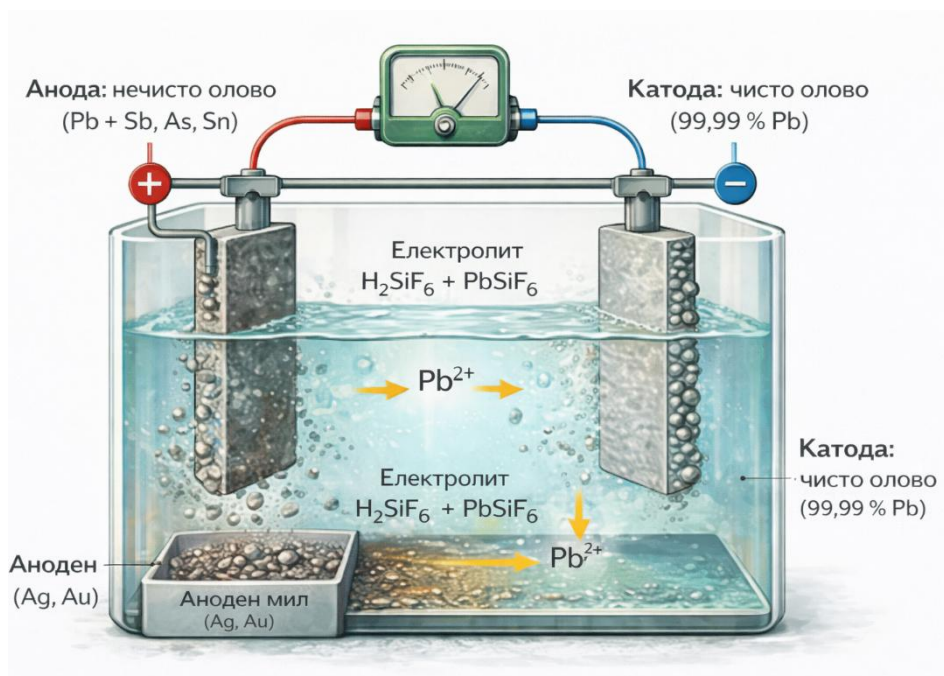


На катодата се таложи **високо чисто олово** со компактна структура.

- Благородни метали

Среброт и златото не се раствораат во електролитот и се акумулираат како: → **аноден мил**

Оваа кал претставува високо вредна секундарна суровина за понатамошна хидро- или пирометалуршка преработка.



Слика 7.12. Електролитичка рафинација на олово

Рафинацијата на оловото претставува завршна и клучна фаза во која суровиот метал се трансформира во финален производ со строго дефиниран квалитет. Пирометалуршката рафинација е технолошки поедноставна и економична, додека електролитичката рафинација овозможува највисок степен на прочистување и ефикасно издвојување на благородни метали. Комбинацијата на овие два пристапи ја прави технологијата на производство на олово целосна, флексибилна и економски оптимизирана.

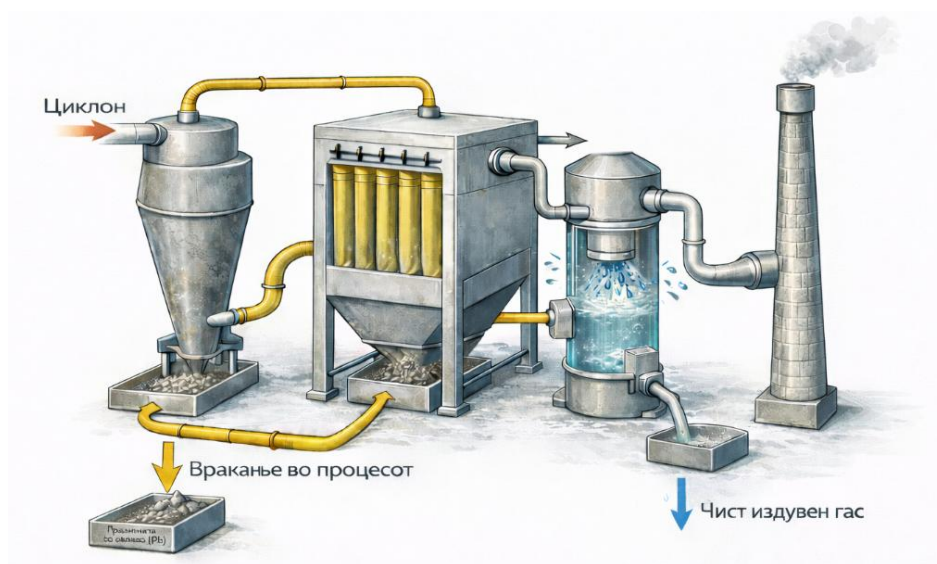
Табела 7.2. Споредбена технолошка оценка

Карактеристика	Пирометалуршка	Електролитичка
Температура	330–400 °C	30–50 °C
Чистота на Pb	до 99,9 %	≥ 99,99 %

Карактеристика	Пиromеталуршка	Електролитичка
Трошоци	пониски	повисоки
Благородни метали	делумно	Целосно издвојување

7.7. Индустриска контрола на емисии

Технолошката обработка на гасните струи е неизоставен дел од процесот. Гасовите од печење и топење содржат SO_2 , прашина богата со Pb и други метали, и трагови на киселински/органски компоненти. Поради токсичноста на Pb, целта е да се постигне висока ефикасност на фаќање прашина и нејзино враќање во процесот, со минимални секундарни емисии.



Слика 7.13. Шематски приказ на типична линија за прочистување на отпадни гасови, составена од циклон, ракавен филтер, скрубер и оцак, при што прашината збогатена со олово (Pb) се рециклира и се враќа во основниот технолошки процес.

Во индустрија се применува комбиниран систем: прво механичко одвојување (циклон), потоа fino филтрирање (ракавест филтер), а по потреба и мокра апсорпција (скрубер). Прашината од baghouse (вреќест филтер) често има значајна содржина на Pb и се враќа во топилницата или во посебна линија за третман. Ова е класичен пример на интерна рециклажа за подобрување на приносот.

Покрај гасовите, трската и дросовите се третираат со цел стабилизација и минимизирање на излужување. Во зависност од

составот, дел од троската може да се гранулира и да се користи како секундарна суровина, додека други фракции се упатуваат кон стабилизација и депонирање според регулативи.

7.8. Рециклирање на оловни акумулатори

Во современата индустрија, значителен дел од оловото се добива од секундарни сировини – особено отпадни акумулатори. Рециклажата се смета за технолошки модул кој може да функционира независно или интегрирано со примарна топилница. Основните операции вклучуваат безбедна демонтажа, механичка сепарација, третман на електролит и топење на Pb-фракцијата.

За студентите, овој модул е добар пример за практична примена на концептот „затворен циклус“. Пластиката се рециклира, електролитот се неутрализира и третира, а металната фракција се враќа во топење. Со ваков пристап се намалува потребата од примарни руди и се намалуваат емисиите по тон произведено Pb.



Слика 7.14. – Технолошка шема за рециклирање на оловни акумулатори: демонтажа → сепарација → третман на електролит → топење → рафиниција

На Слика 7.14 е прикажан интегриран технолошки процес за преработка и добивање на олово, на јасен, едукативен и логично поврзан начин.

1. Демонтажа

Процесот започнува со демонтажа на отпадни Материјали што содржат олово, најчесто акумулатори и други оловни компоненти. Во оваа фаза се врши механичко раздвојување на металните делови од неметалните (пластика, електролит). Целта е да се подготви Материјалот за понатамошна селекција и да се намали загадувањето во следните фази.

2. Сепарација

Во фазата на сепарација, Материјалите се делат според нивната физичка и хемиска природа.

- Пластичните Материјали се издвојуваат како посебен отпад или за рециклирање.
- Оловните фракции (оловни решетки, паста, метални делови) се собираат како главна суровина за топење.

Оваа фаза е клучна за ефикасноста на целиот процес, бидејќи чистата суровина овозможува подобра металуршка обработка.

3. Топење

Издвоеното олово се подложува на пирометалуршко топење во печки. При високи температури, оловото преминува во течна фаза, а нечистотиите се одвојуваат во форма на троска. Во оваа фаза се добива сурово (нерафинирано) олово, кое сè уште содржи растворени нечистотии и легирачки елементи.

4. Третман на електролит

Паралелно со топењето, се врши третман на електролитот (на пример, сулфурна киселина од акумулатори). Електролитот се неутрализира, при што се добиваат цврсти соединенија како оловен сулфат (PbSO_4), кои понатаму може да се преработат или безбедно складираат. Оваа фаза е важна од еколошки аспект, бидејќи спречува испуштање на опасни течности во животната средина.

5. Рафинација

Во фазата на рафинација, суровото олово се подложува на дополнителни термички и хемиски постапки со цел отстранување на преостанатите нечистотии (Sb, Sn, As и др.). Како резултат се добива рафинирано олово со висока чистота, погодно за повторна индустриска употреба – производство на нови акумулатори, легури или други оловни производи.

6. Нуспроизводи и отпад

На долниот дел од сликата се прикажани нуспроизводите од процесот:

- пластични Материјали,
- гипс,
- троска,
- други цврсти остатоци.

Овие Материјали се или рециклираат, или се третираат според еколошките стандарди, што ја нагласува поврзаноста на современата металургија со принципите на кружна економија.

Сликата јасно покажува дека производството на олово не е едноставен процес на топење, туку комплексен технолошки систем што ги обединува:

- механичките операции,
- пирометалуршките процеси,
- хемиски третмани,
- еколошката заштита.

Овој дијаграм претставува одличен пример за интегриран пристап во екстрактивната и секундарната металургија, каде што технолошката ефикасност и заштитата на животната средина одат рака под рака.

Критични точки на процесот се безбедноста (работа со киселина и Pb-прашина), контролата на температурата во топење

и ефикасноста на сепарацијата. Овие аспекти се предмет на инженерска оптимизација.

7.9. Табеларен преглед на типични параметри

Табела 7.3. Ориентациски работни параметри по фази (типични индустриски опсези)

Фаза	Температура	Клучен медиум	Главен излез
Флотација	20–40 °C	водна пулпа + реагенси	Pb концентрат
Печење (ФС)	850–1000 °C	воздух/кислород	калцинат + SO ₂
Висока печка	1100–1300 °C	CO/редукциона атмосфера	сурово Pb + троска
Рафинација	330–700 °C	оксидациона/реактивна фаза	раф. Pb + оксиден талог
Гасно прочистување	100–250 °C	филтри/скрубер	прочистен гас + прашина

Напомена: Опсезите во Табела 7.3 се ориентациски и зависат од конкретна суровина и агрегат. Во инженерска практика, параметрите се дефинираат врз основа на проби, балансни пресметки и мерени податоци.

7.10. Прашања и одговори

1) Што е основната цел на технолошкиот процес на производство на олово?

Одговор: Да се трансформира оловото од минерална (најчесто сулфидна) форма во метално олово со пропишана чистота, со економично искористување на сировините и енергијата и со минимално влијание врз животната средина.

2) Кој е главниот минерал-носител на олово во рудите?

Одговор: Галенит (PbS), кој теоретски содржи околу 86,6% Pb.

3) Со кои сулфидни минерали најчесто е асоциран галенитот?

Одговор: Најчесто со сфалерит (ZnS), пирит (FeS_2) и халкопирит (CuFeS_2), како и со минерали што носат Ag.

4) Зошто е неопходна фазата на дробење, мелење и флотација?

Одговор: За ослободување и физичко одвојување на галенитот од јаловината и добивање концентрат со доволно висока содржина на Pb (типично 60–70% Pb) погоден за пирометалуршка преработка.

5) Кои дробилки се најчести во примарното дробење на оловни руди?

Одговор: Чељусни дробилки (примарно дробење), а потоа конусни/ударни дробилки за секундарно и терциерно дробење.

6) Зошто мелењето обично се организира во затворен циклус со класификатор?

Одговор: За да се постигне стабилна гранулометриска распределба, да се враќаат прегрубите честички во мелницата и да се избегне непотребна потрошувачка на енергија.

7) Како функционира флотацијата на галенит?

Одговор: Со колектори (сулфхидрилни), галенитот станува хидрофобен, се прилепува на воздушни меурчиња и се извлекува како пена, додека јаловината останува во пулпата.

8) Кои се главните цели на печењето на оловниот концентрат?

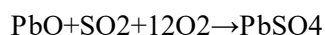
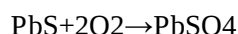
Одговор: (1) Претворање $\text{PbS} \rightarrow \text{PbO}$, (2) отстранување на сулфур како SO_2 , (3) добивање реактивен калцинат и (4) создавање гасна струја со SO_2 погодна за производство на H_2SO_4 .

9) Напиши ја основната реакција на печење (оксидација) на PbS .

Одговор: $2\text{PbS} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{PbO} + 2\text{SO}_2$

10) Кои секундарни реакции може да се јават при печење и зошто се важни?

Одговор: Може да се формира оловен сулфат (PbSO_4):



Важно е затоа што PbSO_4 е потешко редуцибилен од PbO и може да ја намали ефикасноста на топењето.

11) Кој е типичниот температурен интервал за печење на оловен концентрат?

Одговор: Најчесто 850–1000 °C (оптимално 850–950 °C за баланс помеѓу оксидација и ограничување на сулфатирање/синтерување).

12) Кој агрегат е доминантен за печење во современите постројки и зошто?

Одговор: Печка со флуидизиран слој, бидејќи обезбедува одличен контакт цврсто–гас, рамномерна температура и висок степен на оксидација со кратко време на задржување.

13) Која е основната редукциона реакција во високата печка при добивање метално олово?

Одговор: $\text{PbO} + \text{CO} \rightarrow \text{Pb} + \text{CO}_2$

14) Која е улогата на топителите и троската во редукционото топење?

Одговор: Топителите (на пр. CaO -суровини) овозможуваат формирање троска која ги врзува Fe -оксидите и силикатните примеси; правилната троска дава ниска вискозност и минимални загуби на Pb во троска.

15) Зошто Ellingham-дијаграмот (Pb-S-O) е корисен за објаснување на печење и редукција?

Одговор: Бидејќи покажува дека оксидацијата $\text{PbS} \rightarrow \text{PbO} + \text{SO}_2$ е термодинамички повољна, а PbO е релативно нестабилен оксид, па лесно се редуира со CO/C. Затоа патот преку оксид е поефикасен од директна редукција на PbS.

16) Што е „сурово олово“ и кои се типични примеси?

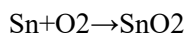
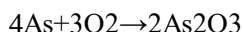
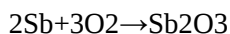
Одговор: Тоа е сурово олово добиено по топење, што содржи Cu, Sb, As, Sn, Bi, Fe и често Ag, Au.

17) На кој принцип се базира пирометалуршката рафинација?

Одговор: На селективна оксидација: примесите се оксидираат полесно од Pb и се издвојуваат како оксиден талог/оксидна пена.

18) Наведи реакции за оксидација на Sb, As и Sn при пирометалуршка рафинација.

Одговор:



19) Што е аноден мил и зошто е важен во електролитичка рафинација?

Одговор: Аноден мил е талог кој се акумулира под анодата и содржи Ag, Au (и други благородни компоненти) кои не се раствораат во електролитот; претставува вреден нуспроизвод.

20) Кој е типичниот систем за прочистување на гасови и што се прави со прашината богата со Pb?

Одговор: Типична линија е: циклон $\rightarrow$ ракавен филтер $\rightarrow$ скрубер $\rightarrow$ оцак, а прашината богата со Pb се рециклира и се враќа во технолошкиот процес.

7.11. СТУДИЈА НА СЛУЧАЈ (CASE STUDY)

❖ Производство на олово (Pb)

Тема: интегрирана анализа на принос, троска, SO₂-линија и интерна рециклажа на Pb-прашина

1. Наслов на студијата

„Оптимизација на пирометалуршко производство на олово од Pb–Zn сулфиден концентрат: принос, троска, SO₂-линија и интерна рециклажа на Pb-прашина“

2. Цели (исходи од учење)

- Да се поврзат сировини → реакции → агрегати → продукти во континуиран технолошки систем за Pb.
- Да се разбере зошто индустриски се избира патот PbS → PbO → Pb (термодинамика/контрола на процесот).
- Да се идентификуваат критични точки: печење (сулфатирање/прашина), висока печка (троска/редукција), рафинација (селективна оксидација/аноден мил), емисии (Pb-токсичност).
- Да се примени „влез/излез“ размислување и основни материјални биланси по фази.
- Да се предложат инженерски мерки за стабилизација на процесот и намалување на загубите и емисиите.

3. Методологија (како се решава случајот)

- Карактеризација на сировината: состав (Pb, S, Zn, Fe, SiO₂, Ag) и гранулометрија на концентратот.
- Мапирање на технолошкиот тек по фази: подготовка/флотација → печење → топење → рафинација → емисии/рециклажа.
- Идентификација на индикатори за перформанса: Pb во троска, Pb во прашина, стабилност на SO₂, состав на сурово Pb.

- Анализа на причинско-последични врски (root-cause): промена на суровина/режим → ефект во печење/печка/емисии.
- Предлог мерки за оптимизација: режим на печење, основност/вискозност на троска, редукционен потенцијал, управување со прашина.

4. Контекст и сценарио (индустриски проблем)

Топилницата преработува сулфиден оловен концентрат од комплексна Pb–Zn руда (галенит, сфалерит, пирит/халкопирит). Постројката работи по класична шема: дробење/мелење → флотација → печење (флуидизиран слој) → редукционо топење (висока печка) → рафинација (пиро/електро) → контрола на емисии (циклон + ракавен филтер + скрубер) → рециклажа на Pb-прашина. Во последните две недели се забележува пад на стабилноста и приносот. Студентите треба да извршат дијагноза и да предложат мерки.

5. Резултати / симптоми (набљудувања во постројката)

- Зголемени загуби на Pb: повисок Pb во троска и/или зголемено носење на Pb во прашина.
- Осцилации во концентрацијата на SO₂ во гасот од печење → нестабилна работа на киселинската фабрика (H₂SO₄).
- Зголемено оптоварување на ракавниот филтер (baghouse) со прашина богата со Pb и Zn.
- Полош квалитет на сурово олово: повисоки Sb/As/Sn → потешка/побавна рафинација и повеќе дрос.

6. Дискусија (технолошка дијагноза и хипотези)

6.1 Веројатни причини (инженерски хипотези):

1. Промена на составот на концентратот (повисоки Zn/Fe/SiO₂) → поголема количина троска и поголемо испарување/прашина.
2. Несоодветен режим на печење (температура/O₂/време) → прекумерно сулфатирање (PbSO₄) и зголемена прашина.

3. Троска со несоодветна основност или вискозност → механичко заробување на Pb-капки и поголеми загуби во троска.
4. Недоволен редукционен потенцијал (CO/CO₂ однос) или нестабилно движење на полнежот → дел Pb останува во оксид/сулфатни форми.
5. „Прашински круг“: рециклажа на прашина без контрола → враќање на фини Pb/Zn фракции → повторно испарување и повторно оптоварување на филтрите.

6.2 Предлог мерки (пример на очекувани инженерски интервенции):

- Печење: стабилизација на температура (850–950 °C), контролирање на вишок O₂ и време на задржување; минимизација на сулфатирање; контрола на гранулометрија и влажност.
- Висока печка: оптимизација на троската (основност CaO/SiO₂, вискозност, температура), подобро одвојување метал/троска; стабилизирање на редукционата атмосфера (CO/CO₂).
- Емисии: подобрување на фаќање прашина (циклон + baghouse), контролирана рециклажа и/или посебен третман на Pb–Zn прашини.
- Рафинација: корекција на секвенца и интензитет на селективна оксидација (Sb/As/Sn), избор на електролитичка рафинација кога се бара ≥99,99 % Pb и/или има значајни Ag/Au.

7. Прашања/задачи за студентите (за дискусија и вежба)

1. Идентификувај три главни места каде се губи Pb (троска, прашина, недореден материјал) и објасни механизам за секое.
2. Објасни зошто индустриски се користи патот PbS → PbO → Pb, а не директна редукција на PbS (термодинамичка и процесна контрола).

3. Предложи две мерки во печење за намалување на сулфатирањето и прашината (температура, O_2 , гранулометрија, време на задржување).
4. Предложи две мерки во висока печка за намалување на Pb во троска (основност, топители, вискозност, температура, стабилност на полнеж).
5. Кога е оправдана електролитичка рафинација во однос на пирометалуршка? Наведи два критериуми (чистота, благородни метали, економија).
6. Опиши краток протокол за контрола на емисии: што се мери (SO_2 , прашина, Pb), каде и кои корективни акции следуваат.

Табела 7.4. ВЛЕЗ/ИЗЛЕЗ по фази (концептуален преглед)

Фаза	Главен влез	Главен производ (излез)	Гасна струја (излез)	Цврсти струи (троска/прашина/дрос)
1. Подготовка и флотација	Pb–Zn руда + вода + реагенси	Pb-концентрат (60–70 % Pb)	—	Јаловина
2. Печење	Pb-концентрат + воздух/ O_2	Калцинат (главно PbO, дел PbSO ₄)	SO_2 + прашина (погодно за H ₂ SO ₄)	Прашина (дел се рециклира)
3. Редукционо топење (висока печка)	Калцинат + кокс + топители (CaCO ₃ /SiO ₂ корекција)	Сурово Pb	CO/CO ₂ (+ траги SO_2), метални парени (Zn)	Троска (CaO–SiO ₂ –FeO) + прашина
4. Рафинација	Сурово Pb (Pb + Cu, Sb, As, Sn, Bi, Ag, Au)	Рафинирано Pb	—	Дрос (оксиди) / аноден мил (Ag, Au)
5. Контрола на емисии	Отпадни гасови + прашина	Прочистен гас	SO_2 -линија/испуст (по третман)	Baghouse прашина (Pb-rich) → рециклажа

Табелата е наменета за систематизација на материјалните струи во процесот. Студентите можат да додадат маси (kg/t) доколку имаат дополнителни податоци.

9. Прилог – клучни хемиски равенки (за користење во материјалот)

- $\text{PbS} + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{PbO} + \text{SO}_2$
- $\text{PbS} + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{PbSO}_4$
- $\text{PbO} + \text{CO} \rightarrow \text{Pb} + \text{CO}_2$
- $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- $\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3$
- $2 \text{Sb} + 3 \text{O}_2 \rightarrow \text{Sb}_2\text{O}_3$; $4 \text{As} + 3 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{As}_2\text{O}_3$; $\text{Sn} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SnO}_2$
- Анода: $\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2 \text{e}^-$; Катода: $\text{Pb}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Pb}$

Литература

1. Ramm, V. V. (1980). *Ferroalloys: Production and Application*. Springer, Berlin.
2. Biswas, A. K. (1981). *Principles of Blast Furnace Ironmaking: Theory and Practice*. SBA Publications, Calcutta.
3. Eremenko, V. A. (1987). *Production of Ferroalloys*. Mir Publishers, Moscow.
4. Gilchrist, J. D. (1989). *Extraction Metallurgy*. Pergamon Press, Oxford.
5. Haque, K. E. (1992). *Principles of Mineral Dressing and Extractive Metallurgy*. Wiley Eastern, New Delhi.
6. Chatterjee, A. (1994). *Beyond the Blast Furnace*. CRC Press, New York.
7. Habashi, F. (1997). *Principles of Extractive Metallurgy*, Vols. 1–4. Quebec: Métallurgie Extractive Québec.
8. Fischmeister, H. F., & Ekström, M. (1998). *Powder Metallurgy of Refractory Metals*. Elsevier, Amsterdam.
9. Habashi, F. (1998). *Handbook of Extractive Metallurgy*. Vols. 1–4. Weinheim: Wiley-VCH.
10. Biswas, A. K., Davenport, W. G. (2002). *Extractive Metallurgy of Copper*. 4th ed. Oxford: Pergamon Press.
11. Gupta, C. K. (2003). *Chemical Metallurgy: Principles and Practice*. Weinheim: Wiley-VCH.
12. Totten, G. E., Funatani, K., & Xie, L. (2004). *Handbook of Metallurgical Process Design*. CRC Press, New York.
13. Rosenqvist, T. (2004). *Principles of Extractive Metallurgy*. Trondheim: Tapir Academic Press.

14. Seetharaman, S. (2005). *Fundamentals of Metallurgy*. Woodhead Publishing, Cambridge.
15. Courtney, T. H. (2005). *Mechanical Behavior of Materials*. Waveland Press, Long Grove.
16. Green, M. A. (2006). *Third Generation Photovoltaics*. Springer.
17. Ghosh, A., Chatterjee, A. (2008). *Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice*. New Delhi: PHI Learning.
18. Davenport, W. G., King, M., Schlesinger, M., Biswas, A. K. (2011). *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals*. Oxford: Elsevier.
19. Schlesinger, M. E., King, M. J., Sole, K. C., Davenport, W. G. (2011). *Extractive Metallurgy of Copper*. 5th ed. Oxford: Elsevier.
20. Kongoli, F., & Itagaki, K. (Eds.) (2012). *Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference*. Springer, Cham.
21. Ray, H. S., Sridhar, R., & Abraham, K. P. (2015). *Extractive Metallurgy of Iron*. CRC Press, Boca Raton.
22. Balasubramanian, N. (2015). *Extractive Metallurgy: Primary Metal Production*. CRC Press, Boca Raton.
23. Donald, J. G. (2015). *Metallurgical Production of Silicon and Ferrosilicon*. Springer.
24. Tupkary, R. H., & Tupkary, V. R. (2017). *An Introduction to Modern Iron Making*. Khanna Publishers, New Delhi.
25. Gupta, R. K. (2018). *Silicon Materials Science and Technology*. Elsevier.
26. Thorne, K. (2019). *Extractive Metallurgy of Molybdenum*. Elsevier, Amsterdam.
27. Hegde, A. C., & Tripathy, B. C. (2019). *Hydrometallurgy: Fundamentals and Applications*. CRC Press, London.

28. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley, Hoboken.
29. Zhang, L., & Wang, C. (2020). *Physical Chemistry of Metallurgical Processes*. Springer, Singapore.
30. Föll, H. (2021). *Silicon: Properties and Technology*. Kiel University.
31. Ueda, S., & Seetharaman, S. (2022). *Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice*. Springer, Cham.

Листа на кратенки во учебникот

- Al** – алуминиум, обоен метал добиван главно со електролиза на растоп
- Fe** – железо, основен метал во црната металургија
- Cu** – бакар, обоен метал добиван пирометалуршки и хидрометалуршки
- Ni** – никел, метал добиван преку каменец и рафинација
- Mn** – манган, метал и легирачки елемент
- Pb** – олово, метал со ниска температура на топење
- Zn** – цинк, метал кој често се добива со дестилација
- C** – јаглерод, редуциско средство и легирачки елемент
- O₂** – кислород, оксидирачки гас
- CO** – јаглерод моноксид, главен редуциски гас во пирометалургијата
- CO₂** – јаглерод диоксид, продукт на оксидациони реакции
- H₂O** – вода, носител на водена фаза во хидрометалургијата
- FeO** – железо(II) оксид, редуktivно активен оксид
- Fe₂O₃** – железо(III) оксид, главна компонента на железните руди
- SiO₂** – силициум диоксид, кисел оксид и главна компонента на троската
- CaO** – калциум оксид (вар), базен оксид и флукс
- Al₂O₃** – алуминиум оксид, кисело-базен оксид во троските
- FeS** – железо сулфид, постојана примеса во каменецот
- Cu₂S** – бакар сулфид, главна компонента на бакарниот каменец
- NiS** – никел сулфид, сулфидна форма на никел
- PbS** – оловен сулфид (галенит), главна оловна руда
- BF** – висока печка, шахтен агрегат за добивање сурово железо
- EAF** – електролачна печка, електротермички агрегат
- DRI** – директно редуцирано железо
- IPPC** – интегрирана превенција и контрола на загадување
- BAT** – најдобри достапни техники (Best Available Techniques)

mm – милиметар, единица за големина на зрно

m²/kg – специфична површина на материјал

°C – степен Целзиус, мерна единица за температура

Толковник на стручни металуршки изрази

1. **Металургија** – инженерска и технолошка дисциплина која се занимава со добивање, преработка и примена на металите и металните материјали.
2. **Екстрактивна металургија** – дел од металургијата кој се занимава со добивање на металите од руди, концентрати и секундарни сировини.
3. **Преработувачка металургија** – дел од металургијата кој се занимава со обработка на металите во полуфабрикати и готови производи.
4. **Руда** – природна минерална сировина која содржи корисен метал во економски исплатлива концентрација.
5. **Минерал** – хемиско соединение во кое металот е врзан во рудата.
6. **Јаловина** – неметален дел од рудата кој не содржи корисен метал.
7. **Металуршки процес** – збир на хемиски и физичко-хемиски операции за издвојување и прочистување на металите.
8. **Пирометалургија** – добивање метали со процеси што се одвиваат при високи температури.
9. **Хидрометалургија** – добивање метали преку растворање во водени раствори и нивно понатамошно издвојување.
10. **Електрометалургија** – добивање и обработка на метали со употреба на електрична енергија.
11. **Електротермички процеси** – процеси во кои електричната енергија се користи како извор на топлина.
12. **Електрохемиски процеси** – процеси во кои електричната струја предизвикува електролитички реакции.
13. **Жарење (пржење)** – пирометалуршка операција при која рудата се загрева без топење заради хемиска подготовка.

14. **Топење** – технолошка операција при која шаржата преминува во течна состојба.
15. **Шаржа** – смеса од суровини, редуктанти и флукови внесени во печката.
16. **Суров метал** – метал добиен по топењето кој сè уште содржи примеси.
17. **Троска** – растоп на оксиди што ги врзува неметалните компоненти и примесите.
18. **Флукс (топител)** – материјал што се додава за регулирање на составот и својствата на троската.
19. **Каменец (мат)** – растоп на сулфиди на метали (FeS , Cu_2S , NiS , PbS) кој претставува меѓупродукт.
20. **Густина (специфична густина)** – маса на единица волумен, важна за одделување на фази.
21. **Дестилација** – процес за добивање метали со ниска температура на вриење.
22. **Сублимација** – премин од цврста во гасовита состојба без течна фаза.
23. **Обогатување (концентрација)** – процес на зголемување на содржината на корисниот минерал во рудата.
24. **Дробење** – механичка операција за намалување на големината на рудните парчиња.
25. **Мелење** – понатамошно ситнење на рудата до фина гранулација.
26. **Сеење (класификација)** – раздвојување на материјалот според големината на зрната.
27. **Гранулометрија** – распределба на честичките според нивната големина.
28. **Надсито** – фракција што се задржува над ситото.
29. **Подсито** – фракција што поминува низ ситото.
30. **Лужење** – селективно растворање на металот од рудата во воден раствор.

31. **Пулпа** – суспензија од цврсти честички и течност.
32. **Згуснување** – одвојување на цврстата фаза од течната со таложeње.
33. **Флокулатори** – супстанции што го забрзуваат таложeњето на честичките.
34. **Филтрација** – одвојување на цврста фаза од течност преку порозна преграда.
35. **Филтер погача** – слој од наталожени цврсти честички на филтерот.
36. **Сушење** – отстранување на механички присутна вода од материјалот.
37. **Металуршка подготовка** – операции за прилагодување на суровината за понатамошна обработка.
38. **Укрупнување** – процес на создавање покрупни парчиња од ситнозрнест материјал.
39. **Агломерација** – термичко спојување на ситни честички во агломерат.
40. **Синтерување** – спечување на честичките при повишена температура без целосно топење.
41. **Брикетирање** – пресување на ситен материјал во брикети со правилна форма.
42. **Пелетизирање** – обликување на ситен концентрат во сферични пелети со вода и врзивни средства.
43. **Пелет** – сферично обликувана честичка подготвена за печење или редукција.
44. **Врзивно средство** – материјал што овозможува спојување на честичките.
45. **Квасливост** – способност на материјалот да се навлажнува со вода.
46. **Површински напон** – физичка појава што влијае на врзувањето на честичките.

ТЕСТОВИ ЗА ИСПИТ

➤ ИСПИТЕН ТЕСТ – ВАРИЈАНТА I

I дел – Прашања со заокружување (1–10)

(За секое прашање заокружи еден точен одговор)

1. Металургијата како стопанска гранка се занимава со:
 - A) Само со рударство
 - B) Производство и преработка на метали и метални материјали
 - C) Само со лиење на метали
 - D) Исклучиво со наноматеријали
2. Делот од металургијата кој се занимава со добивање на металите од руди се нарекува:
 - A) Преработувачка металургија
 - B) Машинска металургија
 - C) Екстрактивна металургија
 - D) Физичка металургија
3. Пирометалуршките процеси се карактеризираат со:
 - A) Работа во водени раствори
 - B) Одвојување на металот со електролиза
 - C) Одвивање при повишени температури
 - D) Исклучиво ниска енергетска потрошувачка
4. Кој од наведените процеси НЕ припаѓа на пирометалуршките процеси?
 - A) Жарење
 - B) Топење
 - C) Лужење
 - D) Дестилација
5. Троската претставува:
 - A) Чист метал
 - B) Растоп на оксиди со различен состав
 - C) Само јаловина
 - D) Гасовита фаза при топење
6. Каменецот е:
 - A) Метална легура
 - B) Растоп на сулфиди на метали

- C) Вид троска
 - D) Вид концентрат без сулфиди
7. Кој процес се користи за метали со ниска температура на вриење (Zn, Hg)?
- A) Топење
 - B) Лужење
 - C) Дестилација
 - D) Синтерување
8. Процесот на селективно растворање на металот од рудата се нарекува:
- A) Флотација
 - B) Лужење
 - C) Жарење
 - D) Брикетирање
9. Првата технолошка операција во подготовката на суровините е:
- A) Мелење
 - B) Сеење
 - C) Дробење
 - D) Филтрација
10. Кој уред најчесто се користи за крупно дробење?
- A) Топчест млин
 - B) Дробилка со чекани
 - C) Вилична дробилка
 - D) Ротациона сушара

II дел – Прашања со краток или наративен одговор

- 11. Дефинирај ја металургијата како инженерска и технолошка дисциплина.
- 12. Објасни ја разликата помеѓу екстрактивна и преработувачка металургија.
- 13. Наведи и накратко објасни ги трите основни групи на металуршки процеси.
- 14. Што е жаловина и која е нејзината улога во металуршките процеси?
- 15. Објасни ја улогата на троската при пирометалуршко добивање на металите.

16. Кои се главните цели на подготовката и обогатувањето на рудите?
17. Опиши го принципот на работа на виличната дробилка.
18. Што претставува гранулометриска анализа и зошто е важна?
19. Наведи ги фазите на обезводнување на концентратите и накратко објасни ги.
20. Зошто укупнувањето (брикетирање, агломерација, пелетизирање) е важно во металургијата?

ИСПИТЕН ТЕСТ – ВАРИЈАНТА II

I дел – Заокружување

1. Главната цел на екстрактивната металургија е:
 - A) Производство на полуфабрикати
 - B) Добивање метали од суровини
 - C) Термичка обработка
 - D) Механичка обработка
2. Хидрометалуршките процеси се изведуваат:
 - A) Во вакуум
 - B) Во гасна фаза
 - C) Во водени раствори
 - D) Во растопени соли
3. Која супстанција останува како талог при лужење?
 - A) Металот
 - B) Јаловината
 - C) Катодата
 - D) Троската
4. Електротермичките процеси користат електрична енергија како:
 - A) Катализатор
 - B) Реагенс
 - C) Извор на топлина
 - D) Растворувач
5. Процесот на топење резултира со:
 - A) Само метал
 - B) Само троска
 - C) Метал и троска
 - D) Метал и гас
6. Каменецот најчесто се јавува кај руди на:
 - A) Железо
 - B) Обоени метали
 - C) Благородни метали
 - D) Алуминиум
7. Кој фактор е основен за одвојување каменец–троска?
 - A) Боја
 - B) Температура

- C) Густина
 - D) Магнетизам
8. Дестилацијата се заснова на:
- A) Разлика во густини
 - B) Разлика во притисок на пареите
 - C) Растворливост
 - D) Магнетни својства
9. Кој процес НЕ е дел од подготовка на сировини?
- A) Дробење
 - B) Мелење
 - C) Сеење
 - D) Рафинација
10. За ситно дробење најчесто се користат:
- A) Вилични дробилки
 - B) Конусни дробилки
 - C) Дробилки со тркала
 - D) Шахтни печки

II дел – Наративни прашања

- 11. Објасни што се подразбира под металуршки процес.
- 12. Наведи примери на готови производи и полуфабрикати.
- 13. Објасни ја улогата на топителите во шаржата.
- 14. Што е лужење и од што зависи неговата ефикасност?
- 15. Опиши го принципот на работа на конусната дробилка.
- 16. Зошто сиромашните руди не се погодни за пирометалургија?
- 17. Што претставува електролиза во металургијата?
- 18. Наведи предности на хидрометалуршките процеси.
- 19. Зошто е важна економската оправданост на технологијата?
- 20. Кои фактори влијаат врз изборот на технолошка постапка?

ИСПИТЕН ТЕСТ – ВАРИЈАНТА III

I дел – Заокружување

1. Преработувачката металургија се занимава со:
 - A) Добивање руди
 - B) Обогадување
 - C) Полуфабрикати и готови производи
 - D) Лужење
2. Главна карактеристика на пирометалургијата е:
 - A) Висок притисок
 - B) Висока температура
 - C) Водена средина
 - D) Ниска енергија
3. Троската во рафинацијата служи за:
 - A) Зголемување на приносот
 - B) Отстранување на примеси
 - C) Ладење
 - D) Растворување
4. Каменецот е меѓупроизвод составен главно од:
 - A) Оксиди
 - B) Сулфиди
 - C) Хлориди
 - D) Нитрати
5. Кој метал најчесто се добива со електролиза на растопи?
 - A) Бакар
 - B) Цинк
 - C) Алуминиум
 - D) Олово
6. Дробењето ја зголемува:
 - A) Густината
 - B) Специфичната површина
 - C) Температурата
 - D) Хемиската чистота
7. Кај мелењето најчесто се користат:
 - A) Чекани
 - B) Вилици

- C) Топчести млинови
 - D) Валјаци
8. Сеењето претставува:
- A) Хемиска операција
 - B) Термичка операција
 - C) Класификација по големина
 - D) Топење
9. Поимот „дијаметар на зрно“ е:
- A) Реална мерка
 - B) Хипотетичка геометриска величина
 - C) Масена величина
 - D) Волумен
10. Современа гранулометриска анализа се врши со:
- A) Сита
 - B) Чекани
 - C) Ласерска апаратура
 - D) Магнети

II дел – Наративни прашања

- 11. Објасни ја поделбата на металургијата.
- 12. Што е јаловина и како се третира?
- 13. Опиши ги фазите на пирометалуршки процес.
- 14. Наведи примери на хидрометалуршки реагенси.
- 15. Објасни ја разликата меѓу дробење и мелење.
- 16. Кои се предностите на електропечките?
- 17. Објасни ја улогата на троската во шахтна печка.
- 18. Зошто е важна подготовката на суровините?
- 19. Што значи одржливо металуршко производство?
- 20. Каква е улогата на металургијата во индустријата?

ИСПИТЕН ТЕСТ – ВАРИЈАНТА IV

I дел – Заокружување

1. Основна суровина за металургијата е:
A) Троска
B) Каменец
C) Руда
D) Полуфабрикат
2. Делот од рудата без корисен минерал е:
A) Концентрат
B) Каменец
C) Јаловина
D) Топител
3. Кој процес НЕ користи вода?
A) Лужење
B) Флотација
C) Пирометалургија
D) Цементација
4. Цементацијата е процес на:
A) Топење
B) Таложeње на метал од раствор
C) Дробење
D) Сушење
5. Кој уред работи со притисок и триење?
A) Вилична дробилка
B) Конусна дробилка
C) Чеканска дробилка
D) Сушара
6. Мелењето најчесто се врши:
A) Само суво
B) Само влажно
C) Суво или влажно
D) Само во вакуум
7. Згуснувањето претставува:
A) Испарување
B) Таложeње на честички
C) Филтрација
D) Сушење

8. Флокулаторите служат за:
- A) Растворање
 - B) Забрзување на таложење
 - C) Оксидација
 - D) Ладење
9. Филтрацијата се одвива на:
- A) Катода
 - B) Анода
 - C) Порозна преграда
 - D) Гасна мембрана
10. Ротационите сушари се користат за:
- A) Топење
 - B) Лужење
 - C) Отстранување на влага
 - D) Рафинација

II дел – Наративни прашања

- 11. Дефинирај ја поимот „технолошка постапка“.
- 12. Кои критериуми мора да ги задоволи една технологија?
- 13. Опиши ја улогата на згуснувачот.
- 14. Што е филтер погача?
- 15. Кои се фазите на обезводнување?
- 16. Објасни ја важноста на рециклирањето во металургијата.
- 17. Наведи примери на електрохемиски процеси.
- 18. Што значи селективност во хидрометалургијата?
- 19. Објасни ја врската металургија–екологија.
- 20. Кои се инженерските цели на металуршките процеси?

Ниту еден дел од оваа публикација не смее да биде репродуциран на било кој начин без претходна писмена согласност на авторот

Е-издание: <https://ukim.edu.mk/e-book/00163>