

## INVESTIGATIONS ON THE COMPOSITION AND THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF PORPHYRY-COPPER ORE

*Teodora Yankova, Todor Angelov, Ivan Nishkov*

*University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia E-mail: inishkov@gmail.com*

**ABSTRACT.** To determine the composition of the primary sulphide ore from a porphyry-copper deposit, the following analyses have been performed: full chemical analysis and X-ray diffraction analysis of material from a technological sample; study of polished sections from the porphyry-copper ore through a polarising microscope in reflected light; phase analysis for determining the forms of copper presence in the ore. Analysis of the particle size at different grinding time has been performed in order to study its grindability and the liberation degree of the valuable minerals in the different fractions of milled ore has been determined. The distribution of the useful components (Cu and Mo) by fractions of ore, ground to 65% of the class - 0.080 mm, has been determined. The Bond Work Index (Wi) has been calculated.

**Key words:** porphyry-copper ore, composition, physico-mechanical properties

### ИЗСЛЕДВАНИЯ ВЪРХУ ВЕЩЕСТВЕНИЯ СЪСТАВ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧНИТЕ СВОЙСТВА НА МЕДНОПОРФИРНА РУДА

*Теодора Янкова, Тодор Ангелов, Иван Нишков*

*Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София;*

**РЕЗЮМЕ.** За определяне на веществения състав на първична сулфидна руда от меднопорфирно находище са извършени следните анализи: пълен химичен анализ и рентгеноструктурен дифрактометричен анализ на материал от техноложка проба, микроскопски наблюдения в отразена светлина на препарати от меднопорфирната руда и фазов анализ, за определяне на формите на присъствие на медта в рудата. Извършен е зърнометричен анализ при различна продължителност на смилане на изходната руда, за изучаване на нейната смлаемост и е определена степента на разкриване на рудните минерали в различните класи на смляната руда. Определено е разпределението на полезните компоненти (Cu и Mo) по класи на рудата, смляна до 65% класа – 0,080 mm. Изчислен е индексът на работа на Бонд (W).

**Ключови думи:** меднопорфирна руда, състав, физико-механични свойства

### Въведение

Меднопорфирните находища представляват важен, доминиращ източник на метала мед, който осигурява около 75% от световния добив на мед, значително количество молибден и злато. Освен тях, като странични продукти се получават също рений, сребро, селен, телур и др. ценни елементи (Sillitoe, 2010; John and Taylor, 2016 и др.). Меднопорфирните находища се характеризират най-често с големи размери и голямо количество на запасите (от порядъка на 100 милиона до няколко милиарда тона руда), с бедна жилково-впръслена минерализация, с ниско съдържание на метали в първичните руди – Cu (0,2 – 1,5%), Mo (< 0,01 – 0,3), Au (< 0,01 – 1 g/t), (Dilles and John, 2021).

Според Григорова (2020) разнородният характер на скалните разновидности усложнява минно-добивния процес, като трудности създава главно раздробяването на минната маса. За изучаване на характеристиките на експлоатационното минно поле и детайлното картиране на скалните разновидности е подходящо и сравнително лесно приложимо да се използват геофизични методики, базиращи се на разликата във физичните свойства на рудните минерали с различен състав и вместиращите ги скали.

Въпреки ниското съдържание на металите, поради големите размери на находищата, наличието на редица ценни съпътстващи компоненти и извършвания добив по открит способ, експлоатацията на меднопорфирните находища е икономически най-ефективна.

В настоящата работа се привеждат данни от извършените изследвания за изучаване на веществения състав и физико-механичните свойства на руда от меднопорфирно находище, във връзка с нейната бъдеща преработка.

### Методи и материали

Изследванията са проведени върху техноложка проба с тегло над 300 kg, съставена от обединени сондажни ядки със сулфидна минерализация от сондажите, с които е проучвано меднопорфирното находище. Пробата е натрошена последователно с помощта на челюстна, валцова и роторна трощачка до необходимата едрина. Извършено е контролно пресяване със сита с едрина на отворите 5 и 2,5 mm, след което получената проба е хомогенизирана, квартована и е отделена средна проба с

тегло 5 kg, от която е взет материал за различните видове изследвания.

За определяне веществения състав на изучаваната руда са извършени следните изследвания: пълен химичен анализ и рентгеноструктурен дифрактометричен анализ на осреднен материал от техноложката проба, минераложки изследвания в отразена светлина под микроскоп на препарати от късови образци и полирани препарати-брикети, изготвени от класа 2,0 - 0 mm. Проведен е фазов анализ за определяне формите на присъствие на медта в рудата – разтворима във вода мед, окисна свободна и свързана мед, първични и вторични медни сулфиди.

Извършени са изследвания на зърнометричната характеристика на изходната руда и за определяне смилемостта на рудата, както и за изучаване степента на разкриване на рудните минерали, в зависимост от продължителността на смилане. Изчислен е енергийният индекс на Бонд.

Всички химични изследвания са извършени в „Евротест Контрол“ ЕАД, съответно: силикатен анализ - с XRF, съдържание на Au – с AAS, съдържание на различни елементи – с ICP-AES, на S и C – с инфрачервена абсорбция, след високотемпературно изгаряне в кислородна среда. В лаборатории на „Евротест Контрол“ ЕАД са направени и рентгеноструктурният дифрактометричен анализ и фазовият анализ на рудата. Микроскопските изследвания за определяне минералния състав на рудата са извършени с помощта на поляризационен микроскоп MEIJI MT 9430, окомплектован с дигитална камера.

Зърнометричният анализ на изходната руда е проведен с лабораторна вибрационна ситова машина Analysete 3, посредством набор от лабораторни сита с размери на отворите на пресевните повърхности както следва: 2,5 mm, 1,25 mm, 0,500 mm, 0,250 mm, 0,125 mm, 0,080 mm. За определяне на зависимостта между времетраенето на смилане и едрината на смления продукт са проведени опити при 4, 7, 10, 12, 15, 20 и 25 минути време на смилане. Определянето на индекса на работата на Бонд е извършено с помощта на стандартна Bond мелница с размери D x L = 305x305 mm; обем на мелницата 22,3 dm<sup>3</sup>; облицовка от гладка стомана; скорост на въртене 70 min<sup>-1</sup> (85% n<sub>кр.</sub>); мелеща среда - стоманени сфери с обща маса 22,544 kg. Определянето на физико-механичните свойства на меднопорфирната руда е направено в лабораториите на МГУ „Св. Иван Рилски“.

## Резултати и дискусия

### Изследвания на веществения състав на меднопорфирна руда, техноложка проба

#### Химичен анализ на меднопорфирна руда, техноложка проба

Данните от направените химични анализи на техноложката проба (Табл. 1) показват, че съдържанието на Cu в рудата е 0,215%, на Mo – 0,0041% и на Au 0,06 g/t. В рудата се установяват повишени съдържания на компонентите SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, K<sub>2</sub>O и др., чиито носители са нерудните фази, съпътстващи рудната сулфидна минерализация.

Таблица 1. Химичен анализ на меднопорфирна руда, техноложка проба

Компоненти	Съдържание (%)
Cu	0,215
Mo	0,0041
Au (g/t)	0,06
Zn	0,0040
Pb	0,0020
As	0,0003
Sb	0,0006
S	0,83
C	0,10
SiO <sub>2</sub>	62,98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,96
CaO	4,65
MgO	1,21
MnO	0,09
Na <sub>2</sub> O	2,44
K <sub>2</sub> O	3,69
TiO <sub>2</sub>	0,48
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,26
зпн	4,61

#### Фазов анализ на медта в рудата от техноложката проба

Резултатите, получени от фазовия анализ (Табл. 2) показват, че основната част от медта - 80,36% е представена от първични сулфидни минерали (халкопирит) и в много по-малка степен от вторични медни сулфиди – 15,62%. Сравнително ниско е съдържанието на окисна мед (3,6%) и на мед, разтворима във вода (0,44%).

Таблица 2. Фазово разпределение на медта в рудата от техноложката проба

Форма на съединението	Съдържание (%)	Разпределение (%)
Cu, разтворима във вода	0,001	0,44
Окисна Cu, свободна	0,004	1,79
Окисна Cu, свързана	0,004	1,79
Cu, разтворима в цианиди	0,035	15,62
Cu, неразтворима в горните разтворители	0,180	80,36
Обща мед	0,224	100,00

#### Рентгеноструктурен анализ на меднопорфирна руда, техноложка проба

Данните от рентгеноструктурния анализ, извършен за определяне минералния състав на техноложката проба, показват, че в количествено отношение рязко преобладават нерудните фази (93%). Те са представени главно от скалообразуващи компоненти на вместващите скали и в много по-малка степен, от съпътстващи орудяването гангови минерали. Рудните фази съставляват около 6 % и са представени от магнетит (3%), пирит (2%) и халкопирит (1%). В най-голямо количество от нерудните минерали е

застъпен кварцът (42%), следван от мусковит (14%), фелдшпати - албит (12%) и микроклин (9%), хлорит – клинохлор (9%), пироксен – диопсид (5%). Нерудните фази, придружаващи сулфидната минерализация, са преимуществено кварц и много по-рядко калцит (1%) и барит (1%).

### **Микроскопски изследвания в отразена светлина на меднопорфирна руда, техноложка проба**

Изследванията са проведени върху три типа микроскопски препарати, изготвени от рудни късови образци, с визуално по-високо съдържание на сулфидна минерализация; от образци с бедна, спорадична рудна минерализация; и върху препарати-брикети от класа 2,0 - 0 mm на техноложката проба.

**В първия тип образци** (с визуално по-високо съдържание на сулфидна минерализация) макроскопски сред вместващата интрузивна скала от диоритов тип се наблюдават кварц-сулфидни жилки, мрежовидно развити фини, взаимно пресичащи се прожилки и дребна впръслена сулфидна минерализация. Сред вместващата скала присъстват и късни, следрудни кварц-карбонатни прожилки. Текстурата на рудата е жилково-впръслена. Главните рудни минерали са представени от пирит и халкопирит. Много по-рядко се срещат магнетит, борнит и ковелин. *Пиритът* е главният, преобладаващ в количествено отношение руден минерал. Наблюдава се във вид на идиоморфни кристали сред кварц-сулфидни жилки, дребни гнезда и впръследи сред вместващата скала. Жилният пирит на места е напукан, като често в него се установяват включения от кварц и магнетит, а по пукнатини в пирита е отложен халкопирит. Среща се и пирит с фини, овални или с неправилна форма включения от халкопирит и халкопирит-пиритинови агрегати. Пиритът сред вместващата скала е по-дребнозърнест и по-рано отложен. Образува самостоятелни гнездовидни агрегати, както и идиоморфни индивиди, или асоциира тясно с халкопирит, който го окантява и кородира. *Халкопирит*: в сравнение с пирита се наблюдава в по-малко количество. Образува самостоятелни прожилки и гнездовидни агрегати или се среща съвместно с пирит сред кварц-сулфидните жилки. Халкопиритовите индивиди и агрегати имат неправилна алотриоморфна форма и често съдържат пирит. Сред вместващата скала минералът образува дребни гнездовидни агрегати с включения от магнетит и пирит. *Борнитът* и *ковелинът* се срещат рядко, в тясна асоциация с халкопирит. Образувани са в резултат на окислението на първичен халкопирит. *Кварцът* е сивобял до млечнобял, плътен до дребнозърнест и представлява главният неруден минерал, предшестваш и съпътстващ сулфидното орудяване. *Калцитът* е по-късен, пресича и прониква в кварц-сулфидната минерализация.

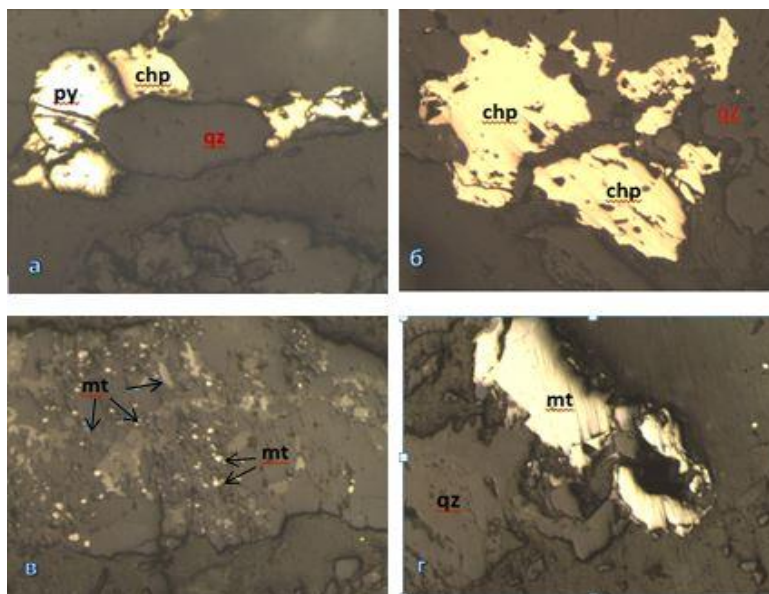
**Във втория тип препарати** (с бедна, спорадична рудна минерализация) общото количество на рудните минерали е около 2-3%. Рудните минерали са представени главно от пирит, халкопирит и магнетит. *Пиритът* образува дребни гнездовидни агрегати и впръследи с идиоморфна форма с размери от 0,05 до 1 mm. Пиритът е поръозен, с фини включения от рутил, кварц и др. нерудни фази. Среща се в самостоятелна форма или съвместно с халкопирит и магнетит. *Халкопиритът* се наблюдава във вид на дребнозърнести, алотриоморфни индивиди и агрегати, отложени в празнини и по пукнатини във вместващата

скала. На места асоциира с пирит и магнетит. *Магнетитът* образува предимно неравномерно разпределени впръследи сред вместващата скала, с изометрична или неправилна форма и заоблени очертания. На места магнетитовите индивиди са частично мартитизирани или мирмекитно прорастнали с илменит и левкоксен. Срещат се и халкопирит-магнетитови и пирит-магнетитови агрегати. Сулфидната минерализация се съпътства от сивобял до млечнобял, плътен до дребнозърнест *кварц*.

**В третия тип микроскопски препарати** (препарати-брикети от класа 2,0 - 0 mm на техноложката проба) се наблюдават фрагменти от вместващите орудяването скали и фрагменти от кварц, на места с впръследи от сулфиди и магнетит и свободни частици от рудни и нерудни фази. Рудните минерали са представени главно от пирит, халкопирит и магнетит. В минимално количество се среща хематит. *Пиритът* се наблюдава под няколко форми – впръследи сред фрагменти от вместващите скали, сред прозрачен, жилен кварц и като свободни частици. Пиритът сред вместващите скали е предимно алотриоморфен, като по-рядко се срещат и идиоморфни кристали, с големина под 100  $\mu\text{m}$ . Много рядко се установява в асоциация с халкопирит или магнетит. Наблюдавани са няколко частици от халкопирит с включения от идиоморфни пиритови кристали с правоъгълни очертания и халкопирит, развит по периферията на пирит. Установени са единични пирит-халкопиритови прожилки сред кварц. Големината на пиритовите агрегати достига до около 500  $\mu\text{m}$ . Пиритът обикновено е еднороден, по-рядко с фини овални или с неправилна форма включения от халкопирит  $\pm$  магнетит. Свободните пиритови частици имат ъгловата, изометрична или неправилна форма, а големината им варира от под 5-10  $\mu\text{m}$  до над 200-250  $\mu\text{m}$ . Срещат се и срастъци с кварц, като е установен единичен пирит-кварцов агрегат с по-големи размери. В препаратите преобладават срастъците на пирит с нерудни фази, следвани от свободни пиритови частици. В минимално количество се срещат тройни срастъци пирит-халкопирит-нерудна фаза (Фиг. 1а). *Халкопирит*: в сравнение с пирита и магнетита, е по-слабо застъпен. Наблюдава се под формата на впръследи сред фрагменти от вместващите скали, сред прозрачен кварц и като свободни частици. Най-често се среща самостоятелно и много по-рядко в асоциация с пирит и/или магнетит. Минералът е алотриоморфен, с неправилни очертания на зърната. Халкопиритовите впръследи сред вместващите скали имат фини размери, докато тези, разположени сред жилния кварц, се отличават с по-големи размери, достигащи до 200-300  $\mu\text{m}$ , в единични случаи до около 600-700  $\mu\text{m}$  (Фиг. 1 б). Свободните халкопиритови частици са с големина, варираща от под 5-10 до 100-150  $\mu\text{m}$ , като единични зърна достигат до 400-500  $\mu\text{m}$ . В препаратите преобладаващ е халкопиритът под формата на впръследи и срастъци с нерудна фаза, следван от свободните халкопиритови частици. В минимално количество присъстват срастъци халкопирит-пирит-нерудна фаза. *Магнетит*: разграничават се две разновидности на минерала. Първата е представена от изобилни фини впръследи сред фрагменти от вместващите скали, втората – от по-големи магнетитови индивиди и агрегати, асоцииращи с кварц (Фиг. 1в,1г). Преобладаващата големина на впръследите е 5 до 15  $\mu\text{m}$ , в редки случаи до около 25  $\mu\text{m}$ . Единични магнетитови зърна с по-големи размери до над 250-350  $\mu\text{m}$  се наблюдават сред

биотитизирани участъци на вместващата скала. Магнетитовите зърна са алотриоморфни, рядко идиоморфни. Втората разновидност е представена от по-големи по размери магнетитови индивиди и агрегати, асоцииращи с кварц. Сравнително рядко магнетитът асоциира с пирит и в единични случаи с халкопирит. Срещат се единични зърна с наченки на мартитизация, с тънък кант от хематит, развит по периферията на магнетита.

Преобладаващата форма на присъствие на минерала е във вид на впръслечи, включения сред вместващата скала и срастъци с кварц. Срещат се отделни свободни магнетитови частици с размери вариращи от под 5  $\mu\text{m}$  до около 150-300  $\mu\text{m}$ . Основният неруден минерал в препаратите е *кварцът*, който предшества и съпътства отлагането на сулфидната минерализация.

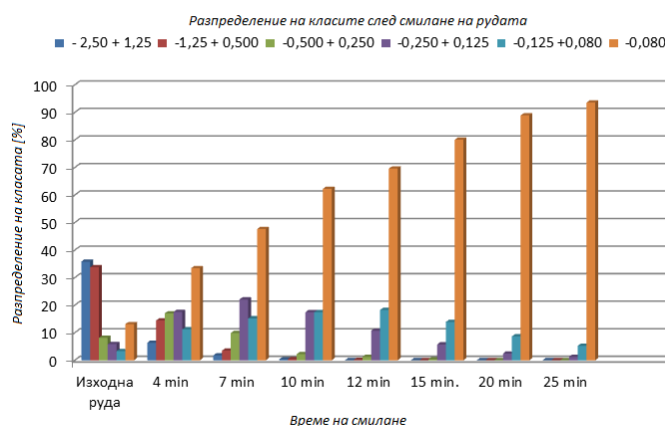


Фиг. 1. Микрофотографии на препарати-брикети от меднопорфирна руда, техноложка проба. Отражена светлина, N //, размер на видното поле 425  $\mu\text{m}$  – а, г; 840  $\mu\text{m}$  – б, в: а) агрегат от пирит (py) и халкопирит (chp), отложен върху кварц (qz); б) халкопирит (chp) в основна маса от кварц (qz); в) магнетит (mt), фини впръслечи сред фрагмент от вместващата скала; г) магнетит (mt), отложен по периферията на кварц-съдържащ неруден агрегат (qz).

### Изследване на физико-механичните свойства на рудата

**Изследване смлаемостта на рудата** Получените резултати са представени в Табл. 3 и Фиг. 2 и 3. Установено е, че за получаване на 65% класа – 0,080 mm е необходима продължителност на смилането 11 минути (Фиг. 4).

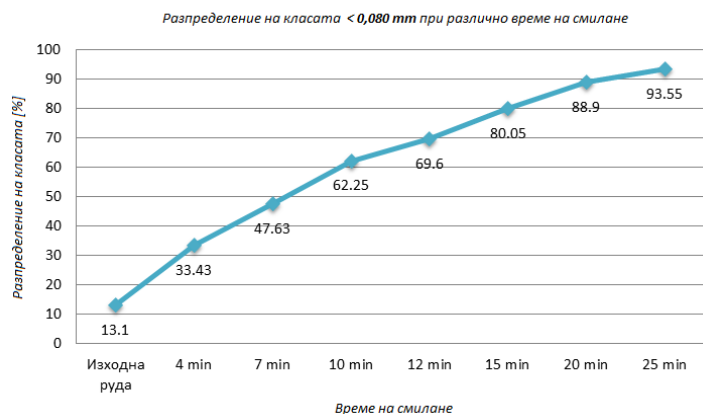
Проведен е зърнометричен анализ на изходната руда, за определяне зависимостта между продължителността на смилане и едрината на смления продукт, с вибрационна ситова машина Analysete 3.



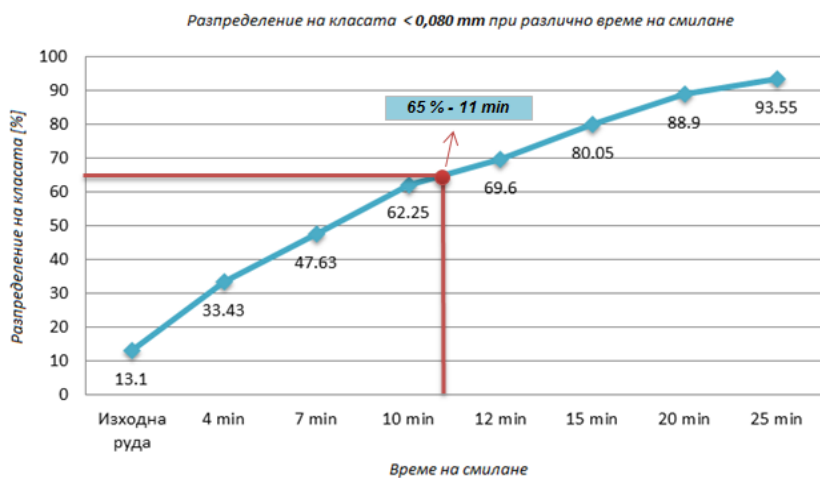
Фиг. 2. Зърнометричен състав на рудата, при различна продължителност на смилане

Таблица 3. Зърнометричен състав на руда от техноложката проба, при различни времена на смилане

Изходна руда Класа (mm)	Добив (%)	Време на смилане	Добив (%)	Време на смилане	Добив (%)	Време на смилане	Добив (%)	Време на смилане	Добив (%)
- 2,50 + 1,250	35,81	4 min	6,36	7 min	1,74	10 min	0,3	12 min	0,0
- 1,250 + 0,500	33,78		14,42		3,49		0,37		0,16
- 0,500 + 0,250	8,15		17,02		9,86		2,2		1,25
- 0,250 + 0,125	5,84		17,53		22,06		17,43		10,74
- 0,125 + 0,080	3,32		11,24		15,22		17,45		18,25
- 0,080	13,1		33,43		47,63		62,25		69,60
<b>Руда</b>	<b>100,00</b>		<b>100,00</b>		<b>100,0</b>		<b>100,00</b>		<b>100,00</b>
- 2.50 + 1,250		15 min	0,0	20 min	0,0	25 min	0,0		
- 1,250 + 0,500			0,0		0,0		0,0		
- 0,500 + 0,250			0,31		0,0		0,0		
- 0,250 + 0,125			5,74		2,43		1,25		
- 0,125 + 0,080			13,90		8,67		5,20		
- 0,080			80,05		88,90		93,55		
<b>Руда</b>	<b>100,00</b>		<b>100,00</b>		<b>100,00</b>		<b>100,00</b>		



Фиг. 3. Разпределение на класа -0,080 mm, в зависимост от продължителността на смилане



Фиг. 4. Определяне на времето на смилане за 65% класа – 0,080 mm

### Изследвания за определяне разпределението на **Си** и **Мо** по класи на рудата и на степента на разкриване на рудните минерали в различните класи

Проведени са експерименти за определяне разпределението на полезните компоненти (**Си** и **Мо**) по класи на рудата, смляна до 65% класа - 0,080 mm и получените резултати са отразени в Табл. 4. Извършени са и микроскопски изследвания за изучаване степента на разкриване на рудните минерали (халкопирит и молибденит) - съдържание на свободни частици и срастъци.

Получените данни показват, че медта и молибденът се съсредоточават главно в класа - 0,080 mm. Съгласно микроскопските наблюдения, халкопиритът почти напълно (90%) се разкрива при големина на зърната -0,125 mm, а молибденитът – при големина - 0,080 mm.

**Данните от лабораторните изследвания за определяне обогатимостта на сулфидната руда показват, че оптималната степен за смилане на рудата е P65 - 0,080 mm.**

Таблица 4 . Зърнометричен състав с разпределение на **Си** и **Мо** по класи на рудата, смляна до 65% клас - 0,080 mm

Класи (mm)	Добив (%)		Съдържание (%)		Разпределение (%)	
	частен	сумарен	Си	Мо	Си	Мо
+0,200	4,51	4,51	0,108	0,0019	2,18	2,15
-0,200+0,125	12,30	16,81	0,123	0,0032	6,73	10,10
-0,125+0,080	18,20	35,01	0,176	0,0029	14,20	13,40
-0,080+0,040	22,98	57,99	0,223	0,0039	22,75	22,58
-0,040+0,025	9,70	67,69	0,286	0,0052	12,35	12,72
-0,025+0,010	18,78	86,47	0,337	0,0058	28,15	27,05
-0,010	13,53	100,00	0,227	0,0035	13,64	12,00
	100,00		0,225	0,0040	100,00	100,00

### Определяне на енергиен индекс на Бонд

Индексът на работа на Бонд е най-широко използваният параметър за измерване на смилаемостта на рудите и скалите (Мочев, 2019; Мочев и Григорова, 2013; 2015). Той се използва за определяне на енергията, необходима за смилане на даден материал по разчетна класа (при точно определен размер на зърната), (Grigorova and Ranchev, 2019). При проведените лабораторни изследвания, стойността му е определена с тест за смилаемост в стандартна Бонд топкова мелница, в 9 цикъла на смилане, за постигане на устойчив резултат.

Основните параметри на теста са следните:

Контролно (разчетно) сито  $P_c = 0,100 \text{ mm}$ ; Количество на пробата за смилане  $M = 1073 \text{ g}$ ; Количество на клас  $-P_c + 0$  в пробата за смилане  $f = 8\% = 0,08$ ; Приблизителна маса (изчислена) на подситовия продукт на разчетното сито при „устойчив цикъл на смилане“  $C = 306,57 \text{ g}$  с циркуляционен товар от 250%.  $C = M/3,5$

Данните от проведения тест за смилаемост на рудата, необходими за изчисляване на индекса на работа на Bond ( $W_i$ ), са следните:  $P_c = 100 \mu\text{m}$ ;  $G = 1,61 \text{ g}$ ;  $F_{80} = 2,17 \text{ mm}$ ;  $P_{80} = 78 \mu\text{m}$ . Изчисленият индекс на работа на Bond ( $W_i$ ) е  $13,9 \text{ kWh/t}$ .

Разходът на енергия за 1 g новообразувана контролна класа -  $W_6$  е  $6,65 \cdot 10^{-3} \text{ kWh/g}$ .

### Заклучение

1. Представената за изследване техноложка проба характеризира първично-сулфидното медно орудяване. Основният ценен компонент в рудата е медта – 0,215 %. Като съпътстващи компоненти с промишлено значение са установени сярата – 0,83 % и молибденът – 0,0041 %. Медта в пробата е представена от халкопирит (80% отн. от

общата мед), вторични медни сулфиди (15,6 % отн. от общата мед) и окисни медни минерали (3,6 % отн. от общата мед).

2. Резултатите от проведените изследвания за смилаемост на рудната проба и определения енергиен индекс на Бонд показват, че сулфидната руда е лесно смилаема.

### ЛИТЕРАТУРА

- Григорова, М. 2020. Геофизични методи при решаване на инженерно-геоложки задачи свързани с повишаване ефективността в условията на открит рудник „Хан Крум“. - *Геология и минерални ресурси*, 6-7/2020, 3-9.
- Мочев, Д. 2019. *Методи за определяне на технологичните характеристики на минерални суровини*, Печатница Разград полиграф ООД, 448 с.
- Мочев, Д., И. Григорова. 2013. *Зърнометрична подготовка на суровините*, ИК „Св. Ив. Рилски“, 268 с.
- Мочев, Д., И. Григорова. 2015. *Въведение в теорията и практиката на рудоподготовка и преработка на минерални суровини*, ИК „Св. Иван Рилски“, 362 с.
- Dilles, J. H., D. A. John. 2021. Porphyry and Epithermal Mineral Deposits. - In: *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*, 847 - 866.
- Grigorova, I., M. Ranchev. 2019. Mineral composition, lead-zinc ores grindability and Bond work index correlation. – In: *Proceedings of the XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference*, 19, issue 1.3, 30 June-06 July 2019, Bulgaria, 869-876.
- John, D. A., R. D. Taylor. 2016. By-products of porphyry copper and molybdenum deposits: Chapter 7. In: *Rare earth and critical elements in ore deposits*, v. 18, (Eds. Verplanck, P. L., M. W. Hitzman), 137 – 164.
- Sillitoe, R. H. 2010. Porphyry-copper systems. - In: *Economic Geology*, 105, 3 – 41.