Analiza industrijskih rezultata faze osnovnog flotiranja rude bakra u Rudniku bakra Majdanpek

JOVICA M. SOKOLOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Tehnički fakultet u Boru, Bor

RODOLJUB D. STANOJLOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Tehnički fakultet u Boru, Bor

LJUBIŠA D. ANDRIĆ, Institut za tehnologiju nuklearnih i
drugih mineralnih sirovina, Beograd

ZORAN M. ŠTIRBANOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Tehnički fakultet u Boru, Bor

NIKOLA J. ĆIRIĆ, Zijin Bor Copper d.o.o.,

Rudnik bakra Majdanpek, Majdanpek

Stručni rad

UDC: 622.765:669.35

DOI: 10.5937/tehnika2004447S

U ovom radu prikazani su rezultati industrijskog ispitivanja faze osnovnog flotiranja rude bakra iz ležišta „Severni revir“ u Rudniku bakra Majdanpek. Ostvareni tehnološki pokazatelji u procesu osnovnog flotiranja, rezultati analize granulometrijskog sastava po klasama krupnoće na ispitivanim proizvodima, kao i iskorišćenja i sadržaj bakra po klasama krupnoće u proizvodima osnovnog flotiranja pokazuju da proces osnovnog flotiranja ne radi zadovoljavajuće.

Ključne reči: ruda bakra, Severni revir, Majdanpek, flotacija, iskorišćenje

1. UVOD

Rudnik bakra Majdanpek (RBM), kao deo kompanije Zijin Bor Copper d.o.o. (ranije poznat kao RTB Bor), jedan je od najvećih i najstarijih rudnika bakra u Srbiji. Rudnik se nalazi u severoistočnom delu Srbije, na udaljenosti od oko 210 km od Beograda i 60 km severo-istočno od Bora, i oko 15 km od Dunava.

Eksplatacija rude bakra vrši se iz ležište bakra Majdanpek, koje se nalazi u severnom delu Timočkog magmatskog kompleksa (TMK) [1], prosečne je širine 300 m, dužine oko 5 km [2]. Sastoji se od dva ležišta bakra: „Severni revir“ i „Južni revir“. Oba ležišta su detaljno proučena i opisana od strane Armstronga i dr. [2].

Ležište bakra „Južni revir“ je tipično porfirsko ležište sa značajnom mineralizacijom bakra i zlata [2, 3]. Ležište je prizmatičnog oblika sa dužom osom po pravcu pružanja ležišta sever-jug koja iznosi preko 2 km

[4]. Moćnost (debljina) rudnog tela (osa istok-zapad) se kreće od 270 do 350 m (srednje 300 m) na višim etažama (+110), da bi se sa povećanjem dubine redukovala na 170 do 250 m.

Dominantni minerali su halkopirit, magnetit, pirit i molibdenit. Zlato i srebro uglavnom su vezani za halkopirit, pirit i ređe formiraju svoje minerale vezane sa platinom. Molibden se nalazi u molibdenitu koji ima povišen sadržaj u periferiji orudnjenja bakra, najčešće u gnajsevima [4, 5].

Ležište bakra „Severni revir“ je drugo po veličini ležište i sastoji se od: 1) porfirska rudna tela: „Centralno rudno telo“ i „Dolovi-1“ 2) Cu-piritska rudna tela: „Dolovi-2“ i „Stari Dušan“ 3) polimetalično rudno telo Tenka [4, 5].

Ležište bakra „Severni revir“ je veoma složenog i heterogenog sastava i sadrži različite tipove rude sa veoma različitim geomorfološkim, strukturno-teksturnim i mineraloškim karakteristikama, što iziskuje primenu različitih tehnologiju za njihovu preradu [6].

Ukupne rezerve bakra u Majdanpeku procenjuju se na 800 Mt, sa srednjim sadržajem bakra 0,4-0,8% i zlata 0,25-1,0 g/t rude [7].

Eksplatacija Rudnika bakra Majdanpek je počela 1955. RBM Majdanpek sastoji se od dva površinska

Adresa autora: Jovica Sokolović, Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, Bor, Vojske Jugoslavije 12

e-mail: jsokolovic@tfbor.bg.ac.rs

Rad primljen: 31.03.2020.

Rad prihvaćen: 08.07.2020.

kopa: „Južni revir“ i „Severni revir“; kao i Flotacije bakra Majdanpek.

Eksploatacija rude bakra sa površinskog kopa „Južni revir“ počela je 1961. godine sa planiranim godišnjim kapacitetom na otkopavanju i preradi rude od 8,5 miliona tona [8].

Eksploatacija rude bakra sa površinskog kopa „Severni revir“ počela je 1983. godine. Tokom osamdesetih godina prošlog veka proizvodni kapacitet dostigao je oko 13 miliona tona rude godišnje [8].

Flotacija bakra Majdanpek je otpočela je sa radom 1961. godine. Činile su je 4 sekcije mlevenja, časovnog kapaciteta 120 t/h svaka i isto toliko sekcija osnovnog flotiranja i prečišćavanja osnovnog koncentrata, sa pogonom odgovarajućeg kapaciteta za filtraciju koncentrata bakra, što je godišnje omogućavalo preradu od oko 3,6 miliona tona rude i proizvodnju koncentrata bakra sa oko 26.000 tona bakra, 1.200 kg zlata i 7.000 kg srebra.

U periodu od 1967. do 1974. godine, sa ciljem povećanja godišnje prerade rude i proizvodnje koncentrata bakra, usledila je dogradnja flotacije, pri čemu je izgrađeno još sedam sekcija mlevenja, kapaciteta 170 t/h i po šest sekcija osnovnog flotiranja i prečišćavanja osnovnog koncentrata. Sve ovo je na godišnjem

nivou, omogućavalo preradu od 12 do 13 miliona tona rude i dobijanje koncentrata bakra sa oko 55 do 60 hiljada tona bakra, 2500 do 3.500 kg zlata i 15 do 18 hiljada kg srebra [8].

U poslednjoj deceniji XX veka kampanjska eksploatacija, sa permanentnim zaostajanjem otkopavanja otkrivke i sa drugim tehnološkim problemima, doveli su 2001. godine do drastičnog smanjenja eksploatacije rude bakra iz ležišta „Severni revir“.

Međutim, krajem 2013. godine ponovo je počela eksploatacija ležišta „Severni revir“. U okviru ovih ispitivanja obuhvaćeni su delovi ležišta sa etaža 395 i 380 [9].

S obzirom na različitost strukture rudnog ležišta „Severni revir“ u odnosu na rudu sa eksploatacionog polja „Južni revir“, za koju je projektovana majdanpečka flotacija, postavlja se pitanje mogućnosti valorizacije korisnih komponenti u postojećem tehnološkom procesu.

U cilju dobijanja odgovora na ovo pitanje izvršeno je snimanje industrijskog procesa osnovnog flotiranja rude bakra po tehnološkoj šemi čiji je opis dat u nastavku teksta.

Tehnološka šema procesa mlevenja i flotiranja rude bakra u Flotaciji RBM prikazana je na slici 1.

Slika 1 - Tehnološka šema mlevenja i flotiranja pogona Flotacije RBM [9]

2. EKSPERIMENTALNI RAD

2.1. Materijal

Snimanje industrijskog procesa osnovnog flotiranja i izuzimanje neophodnih uzoraka imalo je za cilj verifikaciju rada i rezultata koji se postižu u tehnološkom procesu osnovnog flotiranja u flotaciji RB Majdanpek.

Snimanjem tehnološkog procesa osnovne flotacije izuzeta su tri uzorka, i to: 1) preliv hidrociklona, odnosno ulaz u proces flotacijske koncentracije, 2) osnovni koncentrat, i 3) otok procesa osnovnog flotiranja, tj. definitivna jalovina.

2.2. Karakterizacija uzoraka

2.2.1. Analiza granulometrijskog sastava

Rezultati analize granulometrijskog sastava izuze- tih proizvoda dati su u tabeli 1.

Tabela 1. Granulometrijski sastav proizvoda iz industrijskog procesa

Klasa krupnoće (μm)	Ulaz u osnovno flotiranje	Koncentrat osnovnog flotiranja	Jalovina
+ 295	2,80	0,85	4,60
- 295 + 208	8,45	3,50	7,50
- 208 + 147	3,30	2,05	5,30
- 147 + 104	18,55	11,00	20,15
- 104 + 74	7,95	6,50	7,80
- 74 + 53	8,10	7,75	7,35
- 53 + 37	7,65	8,70	6,15
- 37 + 0	43,20	59,65	41,15
Σ	100,00	100,00	100,00

Analizom granulometrijskog sastava ulaza (preliva hidrociklona) možemo konstantovati mali maseni sadržaj zrna krupnoće od 37 do 74 μm koje su „optimalne“ za proces flotiranja i koji iznosi samo 15,75%. Takođe je primetan relativno visok sadržaj krupnijih zrna krupnoće iznad 147 μm od 14,55%, od čega 11,25% većih od 208 μm. Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da je veliko učešće najkrupnijih zrna posledica lošeg klasiranja sirovine u hidrociklonu, odnosno nedovoljna oslobođenost sirovine u mlevenju, što nije bio predmet naše analize u ovom radu.

Sa druge strane, učešće najfinije klase krupnoće ispod 37 μm u ulazu tj. prelivu hidrociklona iznosi 43,20%.

Oslobođenost minerala jedan je od najvažnijih parametara u procesu flotacijske koncentracije [10] u pogledu adsorpcije kolektora na površini minerala, kao i stvaranja agregata mineralno zrno-vazdušni mehurić [11–13]. Takođe, neadekvatno oslobađanje je čest uzrok lošeg iskorišćenja minerala [10]. Treba napomenuti da je za oslobađanje korisnih minerala iz nisko

kvalitetnih ruda bakra i složenog mineraloškog sastava, potrebno vrlo fino mlevenje sirovine, što rezultira vrlo velikom potrošnjom energije [15].

Shodno poznatim osnovama iz teorije procesa flotiranja [16–26], krupnoća mineralnih zrna ima veliku uticaj na mineralizaciju vazdušnih mehurića, raspodelu krupnoće vazdušnih mehurića, kinetiku sudara sa vazdušnim mehurićem, stabilnost/ razdvajanje formiranog kompleksa mineralno zrno-vazdušni mehurić, adsorpciju kolektora, brzinu flotiranja mineralnih zrna, kinetiku procesa flotiranja, kao i iskorišćenje korisne komponente.

Uticaj krupnoće na iskorišćenje korisne komponente predmet je ispitivanja mnogih autora [27–37]. Pionirski rad o uticaju krupnoće zrna na iskorišćenja u procesu flotacije objavili su Gaudin i sar. (1931) [27].

Autori su zaključili da zavisnost flotacijskog iskorišćenja od krupnoće zrna nikada nije linearna funkcija već iskorišćenje raste do nekog maksimuma, nakon čega opada. Pri tome, opseg optimalne krupnoće zrna zavisi od vrste minerala i hidrodinamičkih uslova flotiranja, a brzina flotiranja u okviru iste klase krupnoće od stanja površina zrna, stepena oslobođenosti itd. Prema Gaudinu i dr. [27], maksimalno iskorišćenje minerala bakra ostvaruje se u opsegu optimalne krupnoće zrna od 20 do 100 μm.

U procesu flotiranja mineralna zrna krupnoće ispod 18 μm veoma negativno utiču kako na kinetiku međusobno nezavisnih mikroprocessa (sudar, adhezija, razdvajanje), tako i na ukupno flotacijsko iskorišćenje korisne komponente u koncentratu [38].

2.2.2. Analiza hemijskog sastava po klasama krupnoće

Hemijski sastav, zastupljenost i raspodela bakra, kao i pratećeg sumpora po karakterističnim klasama krupnoće data je u tabelama od 2 do 4, i na slici 2.

Tabela 2. Granulometrijski sastav ulaza u proces osnovnog flotiranja

Klasa krupnoće (μm)	m %	Cu %	S %	Raspodela, %	
				RCu	RS
+ 147	14,55	0,187	2,100	8,72	6,38
- 147 + 74	26,50	0,269	5,160	22,85	28,54
- 74 + 37	15,75	0,322	7,040	16,25	23,14
- 37 + 0	43,20	0,376	4,650	52,18	41,94
Srednja vrednost		0,312	4,791		

Tabela 3. Granulometrijski sastav koncentrata osnovnog flotiranja

Klasa krupnoće (μm)	m %	Cu %	S %	Raspodela, %	
				R _{Cu}	R _S
+ 147	6,40	1,469	4,16	7,83	2,08
- 147 + 74	17,50	1,496	15,05	21,82	20,57
- 74 + 37	16,45	1,297	18,84	17,76	24,20
- 37 + 0	59,65	1,058	11,41	52,59	53,15
Srednja vrednost		1,200	12,805		

Tabela 4. Granulometrijski sastav otoka osnovnog flotiranja (definitivna jalovina)

Klasa krupnoće (μm)	m %	Cu %	S %	Raspodela, %	
				R _{Cu}	R _S
+ 147	17,40	0,106	1,22	21,45	9,22
- 147 + 74	27,95	0,075	2,92	24,47	22,35
- 74 + 37	13,50	0,053	4,99	8,52	22,84
- 37 + 0	41,15	0,093	3,51	45,56	45,60
Srednja vrednost		0,084	3,387		

Na osnovu rezultata analize granulometrijskog sastava ulaza i proizvoda osnovnog flotiranja može se zaključiti da je gornja granična krupnoća približno ista i iznosi oko 300 μm.

Granulometrijski sastavi ulazne rude, koncentrata i otoka osnovnog flotiranja pokazuju da se veoma veliko maseno učešće fine klase krupnoće (ispod 37 μm) nalazi u koncentratu u odnosu na sadržaj tih istih klasa u ulazu i otoku osnovnog flotiranja bakra.

Maseni udeo klase krupnoće (-37+0) μm u koncentratu bakra iznosi oko 60%, i najveći je maseni udeo od svih analiziranih klasa koncentrata bakra, dok je sadržaj te iste klase u ulazu niži i iznosi 43,20%.

Takođe, ovde se nameće jedan „usputni” zaključak da je u prelivu hidrociklona i osnovnom koncentratu malo maseno učešće optimalne klase krupnoće (-74+37 μm) za proces flotiranja.

Sa druge strane, veliko je učešće krupnih klasa krupnoće (iznad 147 μm) u ulazu koje po pravilu imaju sraslace tj. nije dobra oslobođenost minerala.

Veliko maseno učešće ove klase u ulazu od oko 15% ukazuje da bi trebalo obratiti posebnu pažnju na proces mlevenja i klasiranja, odnosno da bi trebalo pokušati da se odgovarajućom tehnološkom shemom procesa mlevenja i klasiranja smanji maseni udeo ove najkrupnije klase.

Isto tako, učešće ove najkrupnije klase u koncentratu osnovnog flotiranja (6,40%), odnosno u otoku (17,40%) pokazuje na loše iskorišćenje i značajan

gubitak bakra (21,45%) u ovoj najkrupnijoj klasi krupnoće. Dakle, sve ovo ukazuje na činjenicu da se u procesu mlevenja i klasiranja ostvaruje nepovoljan granulometrijski sastav rude bakra za proces flotiranja.

Na osnovu tabelarno predstavljenih podataka određena je raspodela bakra u funkciji krupnoće čestica proizvoda flotacije, koja je grafički prikazana na slici 2.

Slika 2 - Raspodela bakra po klasama krupnoće proizvoda osnovne flotacije

Analizirajući dijagram raspodele bakra po klasama krupnoće u proizvodima osnovne flotacije kao i iskorišćenje korisne komponente u funkciji krupnoće čestica, koji je prikazan na slici 2, možemo zaključiti sledeće:

- Sa dijagrama raspodele bakra po klasama krupnoće u ulaznoj sirovini može se videti da je 8,72% od ukupnog bakra zastupljeno u klasama krupnijim od 147 μm. Takođe u ovoj klasi na ulazu u procesa osnovnog flotiranja registrovan je najmanji sadržaj bakra koji iznosi 0,187%.
- Znatno veći udeo bakra nalazi se u česticama krupnoće (-147+74) μm, i to 22,85% ukupnog bakra. Sadržaj bakra u ovoj klasi u prelivu hidrociklona iznosi 0,269%.
- U opsegu optimalne krupnoće zrna od 37 do 74 μm sadržano je svega 16,25% od ukupnog bakra u ulaznoj sirovini.
- Sa istog dijagrama se može videti da je 52,18% bakra zastupljeno u najfinijoj ispitivanoj klasi krupnoće (-37+0 μm).
- Sa dijagrama zavisnosti raspodele bakra od krupnoće može se uočiti slična zavisnost po klasama krupnoće kod koncentrata osnovnog flotiranja, dok se na otoku osnovnog flotiranja (definitivna jalovina) uočava povećano učešće bakra u klasama krupnoće (-147+74) μm i +147 μm, koje iznosi 21,45% i 21,47%. Takođe u najkrupnijoj klasi je i najveći sadržaj bakra (0,106%) u ovom prizvodu flotiranja.

- Iz tabele 2 uočava se da sadržaj bakra po klasama krupnoće raste sa smanjenjem krupnoće na ulazu u proces osnovnog flotiranja, dok je suprotna zavisnost i trend zabeležen kod koncentrata (tabela 3) i kod otoka (tabela 4) osnovnog flotiranja. Najveći sadržaji bakra su u u klasama (-147+74) μm i +147 μm čije vrednosti iznose 1,469% i 1,496% bakra.

Ovakav granulometrijski sastav ispitivanih proizvoda i raspodela bakra po klasama krupnoće ne omogućuje postizanje najboljih tehnoloških rezultata.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1. Tehnološki pokazatelji osnovnog flotiranja

Na osnovu rezultata hemijskih analiza određeni su osnovni tehnološki pokazatelji procesa osnovnog flotiranja u RBM i to:

Maseno iskorišćenje bakra osnovnog flotiranja iznosi: $I_m = 20,43\%$

Tehnološko iskorišćenje bakra u procesu osnovnog flotiranja iznosi: $I_t = 78,58\%$

Selektivnost koncentracije osnovnog flotiranja iznosi: $S = 14,45\%$

Stepen koncentracije osnovnog flotiranja iznosi: $\beta = 3,85$

Gubici korisne komponente u jalovini iznose: $G_j = 21,42\%$

Ostvareni tehnološki pokazatelji u procesu osnovnog flotiranja rude bakra su u pogledu iskorišćenja bakra zadovoljavajući, ali sa aspekta kvaliteta su daleko ispod očekivanja.

Maseno iskorišćenje koncentrata iznosi 20,43%, tehnološko iskorišćenje bakra 78,58%, pri čemu sadržaj bakra u koncentratu osnovnog flotiranja iznosi 1,20%.

3.2. Tehnološko iskorišćenje bakra po klasama krupnoće

Ocenu efikasnosti procesa osnovnog flotiranja možemo da pratimo preko iskorišćenja i sadržaja bakra po uskim klasama krupnoće u proizvodima koncentracije.

Tabela 5. Iskorišćenje korisne komponente po klasama krupnoće u proizvodima osnovnog flotiranja

Klasa krupnoće, μm	KONCENTRAT			JALOVINA		
	$m_k, \%$	Cu, %	$I_t, \%$	$m_j, \%$	Cu, %	$I_t, \%$
+ 147	1,308	1,469	46,68	98,692	0,106	53,32
- 147 + 74	3,575	1,496	75,93	96,425	0,075	24,07
- 74 + 37	3,361	1,297	87,10	96,639	0,053	12,90
- 37 + 0	12,186	1,058	82,52	87,814	0,093	17,48
Σ	20,430			79,570		
sred. vred.		1,200	78,58		0,084	21,42

U tabeli 5 date su vrednosti masenih učešća, sadržaja i iskorišćenja bakra po klasama krupnoće proizvoda koncentracije procesa osnovne flotacije.

Na osnovu ovih rezultata, tehnološki pokazatelji procesa osnovnog flotiranja po klasama krupnoće prikazani su na slikama 3 i 4.

Slika 3 - Tehnološko iskorišćenje bakra po klasama krupnoće u proizvodima osnovnog flotiranja

Sa dijagrama iskorišćenja korisne komponente u funkciji krupnoće čestica koji je prikazan na slici 3 može se uočiti pad iskorišćenja bakra u klasama krupnoća iznad i ispod 74 μm .

U klasama krupnoće iznad 147 μm oko 53% korisne komponente nepovratno odlazi u jalovinu procesa flotacije.

Od ukupnog tehnološkog iskorišćenja bakra u koncentratu 29,65% nalazi se u klasama iznad 74 μm , a koje čine 41,05% ukupne mase ulazne sirovine.

Malo iskorišćenje bakra u najkrupnijoj klasi krupnoće osnovnog koncentrata (46,68%) posledica je velikog masenog učešća ovih klasa, što potvrđuje konstantaciju o nedovoljnoj efikasnosti procesa klasiranja u hidrociklonima.

Iskorišćenje bakra u „optimalnoj“ klasi krupnoće (-74+37) μm iznosi 87,10% što je dobar pokazatelj, s obzirom da je maseno učešće bakra u ovoj klasi u ulazu tek nešto preko 16%.

Gubitak bakra u otoku osnovnog flotiranja kroz „optimalnu“ klasu krupnoće je oko 13%.

Analizirajući isti dijagram uočavamo visoko iskorišćenje najfinijih klasa, klasa ispod 37 μm , u koncentratu. Vrednost iskorišćenja od 82,52% ovih klasa u koncentratu ipak nije dovoljno iz razloga što se oko 17,48% od ukupno sadržanog bakra iz optimalno oslobođene klase krupnoće nepovratno gubi u definitivnoj jalovini.

U cilju poboljšanja tehnoloških pokazatelja u procesu osnovnog flotiranja neophodno je poboljšati iskorišćenje u najkrupnijim klasama. Razlog za nagli pad flotacijskog iskorišćenja zrna krupnoće iznad optimalne može da bude i neadekvatna krupnoća mehurića

koji u tom slučaju nemaju sposobnost da ih iznesu na površinu u sloj flotacijske pene [39].

U literaturi [29-31, 39, 40]. se za rešavanje problema flotiranja krupnih klasa krupnoće preporučuje povećanje doze kolektora i/ili produženje vremena flotiranja.

3.3. Sadržaj bakra u koncentratu po klasama krupnoće

Sadržaj bakra po klasama krupnoće koncentrata osnovnog flotiranja prikazan je na slici 4.

Sa dijagrama zavisnosti sadržaja bakra po klasama krupnoće u koncentratu osnovnog flotiranja (slika 4) može se uočiti drastična promena sadržaja bakra po klasama krupnoće.

Najveći sadržaj bakra je u krupnijim klasama krupnoće (iznad 74 μm) čije vrednosti iznose 1,469% i 1,496%, dok je u klasama ispod 74 μm niži i iznosi 1,297%, odnosno 1,058% bakra.

Slika 4 - Sadržaj bakra po klasama krupnoće u koncentratu osnovnog flotiranja

Sa druge strane, povećan sadržaj bakra u klasi krupnoće ispod 37 μm (0,093%) u otoku procesa osnovnog flotiranja (jalovini) nije samo posledica nedovoljne oslobođenosti minerala bakra, već smanjene flotabilnosti preusitnjenih čestica minerala bakra.

Rezultati ovih ispitivanja potvrdili su ranije rezultate mineraloških i flotacijskih ispitivanja ulazne sirovine [41].

Tehnološko iskorišćenje od 87,10% i 82,52% u najfinijim klasama krupnoće (ispod 74 μm) u koncentratu posledica je dobre oslobođenosti pri čemu najsitnije čestice oslobođenog halkopirita nisu manje od 10 μm . Relativno visoko tehnološko iskorišćenje bakra prati i visoko iskorišćenje sumpora što uzrokuje lošiji kvalitet koncentrata, naročito najfinije klase krupnoće (-37+0) μm , u kojoj je pirit znatno zastupljeniji.

Upoređivanjem dobijenih rezultata industrijskog ispitivanja sa laboratorijskim rezultatima [40] može se zaključiti da je u cilju poboljšanja tehnoloških rezultata neophodna primena novih kolektora i optimizacija

doze kolektora u mešavini kolektora u i koji bi bili efikasniji u procesu osnovnog flotiranja u industrijskom postrojenju Rudnika bakra Majdanpek.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu analize rezultata granulometrijskog sastava preliva i proizvoda osnovnog flotiranja i ostvarenih tehnoloških pokazatelja industrijskog procesa u fazi osnovnog flotiranja može se zaključiti sledeće:

- Analiza granulometrijskog sastava ulaza (preliva hidrociklona) i proizvoda flotiranja pokazuje da je u prelivu hidrociklona i koncentratu malo maseno učešće optimalne klase krupnoće (-74+37 μm) za proces flotiranja. U prelivu hidrociklona, sadržaj zrna u „optimalnoj“ klasi krupnoće (-74+37) μm za proces flotiranja iznosi 15,75%.
- Granulometrijski sastavi ulaza (preliva hidrociklona), koncentrata i otoka osnovnog flotiranja pokazuju da se veoma veliko maseno učešće fine klase krupnoće (ispod 37 μm) nalazi u koncentratu u odnosu na sadržaj tih istih klasa u ulazu i otoku osnovnog flotiranja bakra.
- Maseni udeo klase krupnoće (-37+0) μm u koncentratu bakra iznosi oko 60%, i najveći je maseni udeo od svih analiziranih klasa koncentrata bakra, dok je sadržaj te iste klase u ulazu niži i iznosi 43,20%.
- Sadržaj bakra po klasama krupnoće raste sa smanjenjem krupnoće u ulazu u proces osnovnog flotiranja, dok je suprotna zavisnost zabeležena kod koncentrata i otoka osnovnog flotiranja.
- Prisustvo najkrupnijih čestica krupnoće iznad 147 μm od 14,55% u prelivu hidrociklona posledica je lošeg klasiranja sirovine u hidrociklonu.
- Najkrupnije čestice krupnoće iznad 74 μm zbog velike mase ne flotiraju efikasno, a sa druge strane najveći sadržaj bakra je u ovim klasama i iznosi 1,469% i 1,496%.
- Ovakav granulometrijski sastav ispitivanih proizvoda i raspodela bakra po klasama krupnoće ne omogućuje postizanje najboljih tehnoloških rezultata.
- Maseno iskorišćenje koncentrata je 20,43%, tehnološko iskorišćenje bakra 78,58%, pri čemu sadržaj bakra u koncentratu osnovnog flotiranja iznosi 1,20%.
- Sa dijagrama zavisnosti iskorišćenja korisne komponente od krupnoće čestica (slika 3) može se uočiti pad iskorišćenja bakra u klasama krupnoće iznad i ispod 74 μm . Iskorišćenje bakra u „optimalnoj“ klasi krupnoće (-74+37) μm iznosi 87,10%.

- U cilju poboljšanja procesa osnovnog flotiranja i ostvarivanja većeg iskorišćenja bakra u ovoj fazi flotiranja, neophodno je izvršiti optimizaciju parametara za što efikasnije flotiranje kako finijih klasa krupnoće (do 74 μm) tako i najkrupnijih klasa (iznad 147 μm) krupnoće.
- Eliminisanjem najkrupnijih čestica u ulaznoj sirovini u velikoj meri bi se povećalo iskorišćenje korisne komponente. Ovo se prvenstveno odnosi na povećanje oštine klasiranja u hidrociklonima.

Na kraju može se zaključiti da se na ovaj način može uspešno kontrolisati proces osnovnog flotiranja ruda bakra i da se uvek pravovremeno i adekvatno deluje u cilju poboljšanja ostvarenih rezultata i tehnoloških pokazatelja u procesu osnovnog flotiranja.

5. ZAHVALNICA

Istraživanja predstavljena u ovom radu su urađena uz finansijsku podršku Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru finansiranja naučno istraživačkog rada na Univerzitetu u Beogradu, Tehničkom fakultetu u Boru, prema ugovoru sa evidencionim brojem 451-03-68/2020-14/200131.

LITERATURA

- [1] Heinrich C. A, Neubauer F, Cu-Au-Pb-Zn-Ag metallogeny of the Alpine-Balkan-Carpathian-Dinaride geodynamic province. *Mineralium Deposita*, 37(6), 533-540, 2002.
- [2] Armstrong, R., Kozelj, D., Herrington, R., Porter, T. M. (2005) The Majdanpek Cu-Au Porphyry Deposit of Eastern Serbia: A Review. In Porter, T.M. (Ed), *Super Porphyry Copper & Gold Deposits - A Global Perspective*, PGC Publishing, Adelaide, Vol. 2, pp. 453-466.
- [3] Jankovic S, Herrington R. J, Kozelj D, The Bor and Majdanpek copper-gold deposits in the context of the Bor metallogenic zone (Serbia, Yugoslavia). *Porphyry and Hydrothermal Copper and Gold Deposits*, 169-178, 1998.
- [4] Cocic S, Jelenkovic R, Zivkovic P, Excursion guide. *In Symposia Bor*, Vol. 100, p. 115, 2002.
- [5] Bugarin M, Maksimović M, Ljubojev V, Potentiality and balance the mineral resources of copper and gold in the exploratory-mining field of RTB Bor. *Rudarski radovi*, Bor, (3), 1-16, 2012.
- [6] Marković Z, Milanović D, Ljubojev V, Mineralogical, chemical and physical characterization of copper ore from the deposit "North Mining District" Copper mine Majdanpek. *Rudarski radovi*, Bor, (3), 17-32, 2012.
- [7] Jelenkovic R, Kostic A, Zivotic D, Ercegovac M, Mineral resources of Serbia. *Geol. Carpath*, 59 (4), 345-361, 2008.
- [8] Vujic S, Grujic M, Salatic D, Radivojevic S, Jelenkovic R, *Copper mine Majdanpek: development, state, future [Rudnik bakra Majdanpek: razvoj, stanje, budućnost – in Serbian, with and English abstract]*.– Planeta print, Beograd, 171 p, 2005.
- [9] Ciric N, *Investigating possibilities of improving technological process parameters of the basic flotation of copper ore from deposit "Severni revir" in the Copper Mine Majdanpek*, Master thesis, University of Belgrade, Technical faculty in Bor, Bor, Serbia, 2014.
- [10] Bakalarz A, Duchnowska M, Luszczkiewicz A, Influence of liberation of sulphide minerals on flotation of sedimentary copper ore. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 18, p. 01025). EDP Sciences, 2017.
- [11] Albijanic B, Bradshaw D. J, Nguyen A. V, The relationships between the bubble-particle attachment time, collector dosage and the mineralogy of a copper sulfide ore. *Minerals Engineering*, 36, 309-313, 2012.
- [12] Jameson G. J, The effect of surface liberation and particle size on flotation rate constants. *Minerals Engineering*, 36, 132-137, 2012.
- [13] Štirbanović Z, Sokolović J, Marković I, Đordjević S, The effect of degree of liberation on copper recovery from copper-pyrite ore by flotation. *Separation Science and Technology*, 1-14, 2019.
- [14] Vallejos P, Yianatos J, Vinnett L, Bergh L, Characterization of the industrial flotation process based on size-liberation relationships. *Minerals Engineering*, 121, 189-195, 2018.
- [15] Tomanec R, Milovanovic J, Mineral liberation and energy saving strategies in mineral processing. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 28, 195-205, 1994.
- [16] Gaudin A. M, *Flotation*, 1st ed, McGraw-Hill: New York, 1932.
- [17] Sutherland K. L, Wark I. W, *Principles of flotation*. AusIMM: Melbourne, Australia, 1955.
- [18] Klassen V. I, Mokrousov V. A, *An introduction to the theory of flotation*. (translation by J. Leja and G.W. Poling); Butterworths: London, U.K, 1963.
- [19] Leja J, *Surface chemistry of froth flotation*; Plenum Press: New York, USA, 1982.

- [20]Schulze H. J, *Physico-chemical elementary processes in flotation analysis from point of view of colloid science*. Elsevier Amsterdam, 1984.
- [21]Fuerstenau D. W, *Flotation fundamentals 1, Advances in flotation technology*, SME: Littleton, CO, USA, 1999.
- [22]Nguyen A, Schulze H. J, *Colloidal science of flotation*. CRC Press: Boca Raton, Florida, USA, 2003.
- [23]Lynch A. J, Watt J. S, Finch, J. A, Harbort, G. E, *History of flotation technology. In froth flotation: a century of innovation*. Fuerstenau, M.C., Jameson, G.J., Yoon, R.H., Eds.; SME: Littleton, CO, USA, 2007.
- [24]Leja J, *Surface chemistry of froth flotation*. Springer Science & Business Media: New York, USA, 2012.
- [25]Wills B. A, Finch J.A, *Mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 8th ed.; ElsevierScience: New York, USA, 2016.
- [26]Drzymala J, *Mineral processing. Foundations of theory and practice of metallurgy*, 2nd ed.; Oficyna Wydawnicza PWR: Wrocław; Poland, 2018.
- [27]Gaudin A. M, Groh J. O, Henderson H. B, *Effect of particle size in flotation*. Am. Inst. Min. Metall. Eng., Tech. Publ. 414, 3-23, 1931.
- [28]Trahar W. J, Warren L. J, The flotability of very fine particles-a review. *International Journal of Mineral Processing*, 3(2), 103-131, 1976.
- [29]Trahar W. J, A rational interpretation of the role of particle size in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 8 (4), 289-327, 1981.
- [30]Schulze H. J, New theoretical and experimental investigation on stability of bubble/particle aggregates in flotation: a theory on upper particle size of flotability. *International Journal of Mineral Processing*, 4, 241-259, 1993.
- [31]Tao D, Role of bubble size in flotation of coarse and fine particles - A review. *Separation Science and Technology*, 39 (4), 741-760, 2005.
- [32]Schubert H, On the optimization of hydrodynamics in fine particle flotation. *Minerals Engineering*, 21, 930-936, 2008.
- [33]Feng D, Aldrich C, Effect of particle size on flotation performance of complex sulphide ores. *Minerals Engineering*, 12 (7), 721-731, 1999.
- [34]Marković Z. S, Janković A, Tomanec R, Effect of particle size and liberation on flotation of a low grade porphyry copper ore. *Journal of Mining and Metallurgy A: Mining*, 44 (1), 24-30, 2008.
- [35]Jameson G. J, The effect of surface liberation and particle size on flotation rate constants, *Minerals Engineering* 36-38, 132-137, 2012.
- [36]Sokolović, J. M, Miskovic S, The effect of particle size on coal flotation kinetics: A review. *Physico-chemical Problems of Mineral Processing*, 54 (4), 1172-1190, 2018.
- [37]Cvetičanin L, Vučinić D, Lazić P, & Kostović M, Effect of galena grain size on flotation kinetics. *Journal of Mining Science*, 51(3), 591-595, 2015.
- [38]Cvetičanin L, *Uticaj krupnoće galenita na kinetiku flotiranja*. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2017.
- [39]Derjaguin B. V, Dukhin S. S, *Theory of flotation of small and medium-size particles*. Institution of Mining and Metallurgy, 241-267, 1961.
- [40]Jameson G. J, Advances in fine and coarse particle flotation. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 49 (4), 325-330, 2010.
- [41]Sokolović J, Stanojlović R, Andrić L, Štirbanović Z, Čirić N, Flotation studies of copper ore Majdanpek to enhance copper recovery and concentrate grade with different collectors. *Journal of Mining and Metallurgy A: Mining*, 55 (1), 53-65, 2019.

SUMMARY

ANALYSIS OF THE INDUSTRIAL RESULTS OF THE ROUGH FLOTATION PROCESS OF COPPER ORE IN MAJDANPEK COPPER MINE

This paper presents the results of an industrial testing of the phase of rough flotation of copper ore from the deposit „North revir” in the Copper Mine Majdanpek. The achieved technological parameters in the rough flotation process, the results of grain size analysis by size classes of on the tested products, as well as the recovery and content of copper by size classes in the products of rough flotation show that the process of rough flotation does not work satisfactorily.

Key words: copper ore, North revir, Majdanpek, flotation, recovery.