Valorizacija kompleksne polimetalne rude iz ležišta „Čoka Marin“

SLAVKO T. TORBICA, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

PREDRAG M. LAZIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

ALEKSANDAR M. PAČEVSKI, Univerzitet u Beogradu,

Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Stručni rad

UDC: 553.3/4(497.11)

DOI: 10.5937/tehnika1803349T

Kompleksno polimetalno ležište „Čoka Marin“ istražuje se dugi niz godina. Zbog složenog mineralnog sastava i visokog sadržaja pre svega plemenitih metala predstavlja poseban izazov za rudarsku struku. U poslednjih par godina intenzivirani su radovi na pripremi rudnog tela „Čoka Marin-1“ za otkopavanje, i pripremu ove rude u flotaciji u Majdanpeku i metalurška preradu kolektivnog koncentrata. Iznalaženje mogućnosti topljenja kolektivnog bakrovog koncentrata sa plemenitim metalima otvorilo je mogućnost valorizacije ove rude. U ovom radu daje se detaljna analiza mogućnosti otkopavanja rude iz ležišta „Čoka Marin“ sa analizom stabilnosti. Potom se daju rezultati detaljne mineraloške analize sa načinom pojavljivanja posebno plemenitih metala i na kraju se daju rezultati istraživanja mogućnosti flotacijske koncentracije ove rude.

Ključne reči: polimetalna ruda, stenski masiv, mineraloška analiza, flotacijska koncentracija

1. UVOD

Ležište „Čoka Marin“ se nalazi na tromedi sela Leskovo, Jasikovo i Vlaole na oko 14 km južno od Majdanpeka.

Mineralizovana zona ležišta „Čoka Marin“ je istraživana sa površine prospekcijom terena, dubinskim bušenjem i geomagnetnim i geoelektričnim metodama. Izvedenim istražnim radovima definisana su tri rudna tela: Čoka Marin-1, 2 i 3. U gornjem delu rudnog tela Čoka Marin-1 preovlađuju polimetalni: 2,18% Cu, 4,28% Zn, 1,62% Pb, 6,15 g/t Au, 105,8 g/t Ag. Čoka Marin -2 sadrži 0,99% Cu, 9,51% Zn 0,23% Pb, 16,23 g/t Au, 222,6 g/t Ag. Ruda Čoka Marin -3 sadrži 0,9% Cu, do 6% Zn, 2% Pb, 1,8 g/t Au, 17 g/t Ag. Ovi rezultati ukazuju da se radi o rudi sa vrlo složenim hemijskim i mineralnim sastavom. Dodatni problem kod prerade ove polimetalne rude bakra, olova, cinka, zlata i srebra predstavljaju visoki sadržaji štetnih komponenti, kao što su živa, nikl, kadmijum i arsen. Dosadašnjim istraživanjima nisu dobijeni selektivni koncentracije osnovnih metala sa zadovoljavajućim iskorišćenjem zlata i

dozvoljenim sadržajem štetnih komponenti.

Problem je moguće rešiti kolektivnom koncentracijom sulfidnih minerala sa visokim iskorišćenjem zlata i limitiranim sadržajem arsena. Ovakav koncentrat se može tržišno valorizovati na zadovoljavajući način. Proizvodnja ovakvog kolektivnog koncentrata je uslovljena ulaznim sadržajem metala u rovnoj rudi, te je na bazi srednjeg, odnosno graničnog sadržaja metala izdvojeno rudno telo, sačinjeno od pojedinih delova ležišta, koje se može ekonomično eksploatirati.

2. GEOLOŠKE KARAKTERISTIKE LEŽIŠTA I KLASIFIKACIJA STENSKOG MASIVA

Rudno telo „Čoka Marin“ se nalazi na kontaktu hidrotermalno izmenjenih vulkanskih breča amfibol-biotit andezita i hidrotermalno promenjenih amfibol-biotit andezita. Rudno telo je zastupljeno štokverknoprecipitacionim i masivno-sulfidnim orudnjenjem sa: mineralima bakra (enargit, luzonit, halkopirit i u manjoj meri bornit, kovelin i halkozin); piritom i lokalnim pojavama sfalerita i galenita praćenim sulfosolima antimonima i arsena.

Okolne stene rudnih tela su hidrotermalno izmenjeni silifikovani, kaolinisani i alunitisani dacito-andeziti, lavobreče, eruptivne breče i tufovi. Povlatu rudnosne strukture čini sedimentna serija predstavljena pelitskim stenama sa čestim interstratifikacijama tufova

Adresa autora: Slavko Torbica, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Dušina 7

e-mail: slavko.torbica@rgf.bg.ac.rs

Rad primljen: 15.05.2018.

Rad prihvaćen: 29.05.2018.

i vulkanskih breča. Podinu čine hidrotermalno izmenjeni andeziti i andezitske breče. Neposredno iznad rudnih tela uočeno je široko rasprostranjenje hidrokvartca sa povišenim koncentracijama zlata.

U geološkom prostoru od interesa za otkopavanje rudnog tela „Čoka Marin-1“ izdvojeni su sledeći litološki članovi: neizmenjeni andezit, pelit, masivna piritna i polimetalična ruda, brečizirana i zdrobljena zona sa muglama masivne piritne rude, andezit zdrobljen i izmenjen i alterisan andezit.

Zbog dugog stajanja izrađenih prostorija, koje su delom zarušene, a delom podgrađene nije urađeno sistematsko snimanje svih ruptura u stenskom masivu pa nije ni bilo moguće razvrstavanje pukotina u sisteme sa reprezentativnim elementima pada. Međutim, snimljene su i opisane sve dominantne rupture u izrađenim jamskim prostorijama. Osim toga, po preporukama Hoek-a i Marino-as [1], izvršeno je određivanje geološkog indeksa čvrstoće (GSI) za sve izdvojene litološke članove, tabela 1.

Tabela 1. Procenjeni geološki indeks čvrstoće izdvojenih litoloških članova [1]

Litološki član	GSI
Neizmenjeni andezit	70
Pelit	65
Masivna piritna i polimetalična ruda	70
Brečizirana i zdrobljena ruda	35
Andezit zdrobljen i izmenjen	25
Alterisan andezit	40

3. OTVARANJE I PRIPREMA ZA OTKOPAVANJE

Rudno telo „Čoka Marin 1“ je visinski pozicionirano između K+536m i K+575m i faktički je otvoreno sa dva istražna potkopa i dva vertikalna okna koja ih povezuju. Kompletiranje otvaranja ležišta odnosno pripreme za otkopavanje obuhvata:

- Izradu ventilaciono-rudnog okna, odnosno proženje okna od nivoa potkopa 553 do površine terena koja se na lokaciji okna originalno nalazi na K+580 m.
- Izrada dve rampe i to: gornje rampe koja kreće sa nivoa potkopa 553, koji se u zoni rudnog tela odnosno lokacije početka rampe nalazi na K+534, i ide do najvišeg otkopnog nivoa 572 m; i donje rampe koja povezuje potkope 536 i 553.

Osim rampi u ovoj fazi rade se pristupni hodnici-rampe koji povezuju otkope na svakom otkopnom nivou sa rampom i rudno-ventilacionim oknom. I rampe i pristupni hodnici imaju karakteristike i objekata otvaranja i pripreme, što je uobičajeno kod otkopavanja malih ležišta. Prostorni izgled jamskih prostorija

otvaranja i pripreme dat je na slici 1. Pošto će se sa rampom kretati specijalna vozila za zasipavanje pod punim opterećenjem, rampa je projektovana sa nagibom 1:8.

Slika 1 - Prostorije otvaranja i pripreme u jami „Čoka Marin-1“

4. OTKOPAVANJE

Osnovna karakteristika rudnog tela „Čoka Marin“ je veoma visoka vrednost rude, koja nesumnjivo nameće potrebu otkopavanja sa minimalnim konstrukcionim i operativnim gubicima. Ruda i okolni masiv su izdvojeni rasedima, a pojedini delovi okolnog masiva su i veoma ispucali. Pojedini delovi masiva imaju veoma malu vrednost GSI, slika 2. Sa slike je očigledno da je kvalitetni masivni deo rudnog tela okružen stenama sa malim indeksom geološke čvrstoće koje čak ni prostorijama sa malim rasponima ne obebeđuju stabilnost duže vremena.

Slika 2 - Presek rudnog tela „Čoka Marin“ sa litologijom i vrednostima GSI

Nesumnjivo se otkopavanje ovog rudnog tela mora obavljati metodama otkopavanja sa zamenom mase otkopane rude zasipom. Pošto se imperativno mora otkopati celokupna rudna masa zasip neizostavno mora biti očvrstnut.

Sa obzirom na činjenicu da je kompletna rudna masa izrasedana i ispucala, a da je deo rude zdrobljen i sa veoma malim indeksom geološke čvrstoće (GSI=35) i da je krovinski bok rudnog tela veoma slab (GSI=25), zbog sigurnosti rada u prvom redu, a i zbog zahtevanog visokog iskorišćenja i minimalnog osiromašenja, otkopavanje treba obavljati odozgo na dole. Za zasipavanje treba koristiti portland cementom očvrslu (cementirani) kameni granulnat sa konsolidacionom ugradnjom.

Metoda izbora za otkopavanje rudnog tela „Čoka Marin“ je: Underhand Cut and Fill Mining.

Otkopavanje ovom metodom se vrši odozgo na dole sistemom paralelnih hodnika sa njihovim neizmeničnim otkopavanjem i zasipavanjem. Po završenom otkopavanju prvog, najvišeg odseka pristupa se otkopavanju sledećeg prvog odseka ispod, na isti način, s tim što su trajektorije otkopnih hodnika na dva susedna nivoa upravne jedne na druge (teži se da ugao bude što bliži 90°). Otkopni nivoi su povezani rampom, kojom se kreću ljudi i oprema za bušenje, utovar i odvoz rude i dovoz zasipa.

Utovar se obavlja dizel utovaračima kojima se ruda i odvozi, otkopnim hodnikom, pristupnim hodnikom i rampom do rudnog okna.

Za zasip se koristi očvrstnuti, cementirani kameni granulat (CKG) i primenjuje se njegova konsolidaciona ugradnja. Za ovu vrstu zasipa uobičajene vrednosti jednoaksijalne čvrstoće na pritisak kreću se od 1 do 11 MPa, a modula deformacije od 300 do 1000 MPa. Iskustva iz više rudnika pokazuju da se na uzorcima očvrstlog zasipa u laboratoriji na malim uzorcima dobijaju znatno veće vrednosti čvrstoće nego pri merenjima *in situ*, [2]. Brojni su razlozi za ovaj fenomen, a opšteprihvaćena je preporuka da se računске vrednosti čvrstoće formiraju umanjnjem laboratorijskih vrednosti za 50%.

Za konsolidacionu ugradnju se koristi kamion sa trakastim bacačima zasipa. Ovakvim načinom ugradnje postiže se bolja zbijenost i veća čvrstoća ugrađenog zasipa. Otkopavanje se obavlja odozgo na dole i u povlačenju ka ulazu u otkop, odnosno spojnom hodniku. U okviru jednog odseka otkopavanje se obavlja dvofazno. U prvoj fazi vrši se otkopavanje rude u svakom drugom otkopnom hodniku i zapunjavanju praznog prostora cementiranim kamenim granulatom. Kada ugrađeni zasip postigne zahtevanu čvrstoću otkopava se ruda između dva veštačka stuba od CKG-a.

U prvoj fazi otkopavanja opterećenje višeležećih stena nose stubovi od rude. U drugoj fazi, uklanjanjem stubova od rude, opterećenje se prebacuje na stubove od očvrstnutog kamenog granulata.

Slika 3 - Detalj otkopavanja na otkopnom odseku 560/563

Zbog toga je veoma bitno da se otkopavanju stuba rude između dva stuba od CKG-a pristupi tek kad stubovi od CKG-a postignu zahtevanu čvrstoću, odnosno kad steknu odgovarajuću nosivost.

Na slici 3 pokazano je otkopavanje jednog odseka (560/563) sa mogućom situacijom na otkopu kada je završena prva faza i kada su prisutna otkopna radilišta sa otkopavanjem i sa zasipavanjem otkopa druge faze.

Na slici 4 je pokazan izgled svih otkopa sa prostorijama otvaranja i pripreme.

Slika 4 - Svi otkopni odseci sa prostorijama otvaranja i pripreme

Pre ugradnje CKG na pod otkopa koji se zasipava razastre se geomreža odgovarajućih dimenzija i zatezne čvrstoće.

Provetravanje prostorija otvaranja i pripreme je protočno, a provetravanje otkopnih radilišta je separatno. Vazduh u jamu ulazi potkopom zatim ide rampom na gore do pristupnog hodnika aktivnom radilištu kojim se uvodi u transportno ventilaciono okno kojim se izbacuje na površinu.

Ispod aktivnog otkopnog nivoa rudno-ventilaciono okno se koristi kao rudno, a iznad kao ventilaciono-prolazno okno.

Bušenje minskih bušotina se obavlja ručnim bušaćim čekićima, tj. miniranje se obavlja kratkim minskim bušotinama u paralelnom rasporedu.

Utovar i odvoz odminirane rude od otkopa do rudnog okna obavlja se dizel utovaračem, koji se koristi i za servisiranje otkopnih radilišta.

Zasipavanje otkopanih prostora se obavlja specijalnim vozilom za transport i konsolidacionu ugradnju cementiranog kamenog granulata [3].

Dimenzionisanje otkopnih hodnika i određivanje minimalne jednoaksijalne pritiskne čvrstoće zasipa određeno je na modelima konačnih elementa. Korišćen je specijalizovani softver za analizu podzemnih konstrukcija u čvrstim ispucalim stenama Phase2 Ver. 7.014 od marta 2010. Rocscience Inc. Toronto [4].

Ovakvim načinom otkopavanja ostvariće se iskorišćenje rude od 94% uz razblaženje od 5%, a očekuje se ostvarenje otkopnog učinka od 17 t/nad.

5. MINERALOŠKA ISTRAŽIVANJA

U okviru mineraloških istraživanja definisan je način pojavljivanja određenih minerala, srastanje i prorastanje, krupnoća zrna pojedinih minerala i prognozirana potrebna finoća mlevenja rude za odgovarajući stepen oslobađanja minerala.

Ležište „Čoka Marin“ je najvećim delom obrazovano u prvom, glavnom stadijumu orudnjenja. Tokom ovog stadijuma okolna stena je hidrotermalno alterisana (generalno silifikacija, piritizacija i glinovita alteracija) uz istovremeno obrazovanje žične, sočivaste do masivne Cu-piritske rude. Drugi, polimetalični, stadijum orudnjenja je pored piritita i bakrovih minerala bogatiji Zn-Pb mineralima, sfaleritom i galenitom. Polimetalična ruda obrazovana u ovom stadijumu orudnjenja preseca rudu iz prvog stadijuma, a deponovana je uglavnom u apikalnim delovima rudnih tela.

Pirit je dominantan sulfidni mineral u ovom ležištu i zajedno sa baritom i kvarcom čini najzastupljenije minerale u rudnim telima. Zatim po zastupljenosti sulfida slede minerali bakra, najpre enargit i luzonit, i u nešto manjoj količini halkopirit, bornit, kovelin, halkozin i tenantit-tetraedrit, dok se idait i koluzit sasvim retko javljaju. Pored navedenih minerala često prisutni sulfidi su sfalerit, galenit, markasit i sulfosoli olova. Samorodno zlato legirano srebrom se retko javlja u ispitivanom ležištu i predstavlja jedini mineral ovih plemenitih metala. Ostali, uglavnom prateći minerali čije je prisustvo u ležištu utvrđeno su: kaolinit, dikit, rutil, anatas, gips i alunite. Mineralne parageneze ležišta detaljno su prikazane u radu [5].

Bakar je gotovo uvek prisutan u piritu u koncentracijama do 8,0%, a prethodna istraživanja su pokazala da je bakar strukturno-vezan u piritu, tj. da zamenjuje gvožđe u strukturi [6]. Zone piritita bogate olovom do 7,0%, srebrom do 1,0% i arsenom do 2,3% se mestimično javljaju u ležištu, a prate oscilatornu i sektorsku zonarnost kristala piritita. Optičkom mikroskopijom i skenirajućom elektronskom mikroskopijom utvrđeno je da su ove zone uglavnom homogene na mikrometarskoj skali. Međutim, upotrebom transmisije elektronske mikroskopije (TEM), u ovim zonama je utvrđeno prisustvo homogeno raspoređenih nanometarskih inkluzija (uglavnom <50 nm) koje su nosioci Pb, Ag i As u piritu [5]. Ređe se u ležištu javlja i arsenički pirit sa sadržajem arsena do 4,0%.

Minerali $\text{Cu}_3(\text{As,Sb})\text{S}_4$ sastava su najzastupljeniji minerali bakra u ležištu „Čoka Marin“, pri čemu je luzonit nešto zastupljeniji od enargita. Luzonit se javlja u masivnim agregatima (slika. 5 a, b), dok enargit pored masivnih agregata obrazuje i kristalne forme veličine do 1 cm. Oba minerala grade prilično čvrste raznovrsne i složene teksturne odnose sa ostalim mineralima, ponajviše sa ostalim mineralima Cu i piritom.

Minerali iz grupe tetraedrita, $\text{Cu}_{12}(\text{Sb,As})_4\text{S}_{13}$, tj. tetraedrit-tenantit serije su često prisutni u ležištu, ali se ne javljaju u većim količinama i predstavljaju sporedni mineral bakra (slika 5). Mikrohemijske analize ovih minerala [7] pokazuju da As-bogatiji član, tj. tenantit dominira u odnosu na tetraedrit.

Halkopirit, CuFeS_2 obrazuje nepravilne sitnozrne do krupnozrne agregate, koji uglavnom prorastaju sa drugim rudnim mineralima. Međutim, pored uobičajenog načina pojavljivanja, ovaj mineral obrazuje i karakteristične teksture zamenjivanja drugih rudnih minerala (najčešće luzonita) kako iz glavnog Cu-piritskog, tako i iz kasnijeg, polimetaličnog stadijuma orudnjenja, na osnovu čega može da se pretpostavi da je ovaj karakteristični tip halkopiritita obrazovan na kraju hidrotermalne aktivnosti.

Bornit, Cu_5FeS_4 , halkozin, Cu_2S , i kovelin, CuS , slabije su zastupljeni u ležištu „Čoka Marin“ u odnosu na prethodno pomenute minerale bakra, ali u pojedinim apikalnim delovima rudnog tela 1 predstavljaju i dominantne minerale bakra (slika 5c). Idait, Cu_5FeS_4 , se javlja u zanemarljivim količinama i zajedno sa halkopiritom predstavlja produktat raspadanja bornita. Koluzit, $\text{Cu}_{12-13}\text{V}(\text{As,Sb,Sn,Ge})_3\text{S}_{16}$ je krajnje redak mineral u ležištu.

Slika 5 - Mineralna asocijacija minerala bakra iz ležišta „Čoka Marin“ (odbijena svetlost, vazduh, //N). Skraćenice: Bn – bornit, Ccp – halkopirit, Cv – kovelin, Eg – enargit, Lz – luzonit, Py – pirit, Sp – sfalerit, Tn – tenantit

Sfalerit, ZnS je jedan od glavnih rudnih minerala u ispitivanom ležištu. Javlja se u masivnim agregatima i najčešće je intimno prorastao sa drugim rudnim mineralima (slika 5d), uglavnom sa halkopiritom, galenitom i baritom. Pored masivnih agregata, ovaj mineral često obrazuje i kolomorfne teksture (slika 6).

Galenit, PbS obrazuje masivne agregate, koji uglavnom asociiraju sa sfaleritom sa kojim je često istovremeno i obrazovan, zatim baritom i piritom, a u više

uzoraka pokazuju teksturu zemenjivanja, pri čemu halkopirit zamenjuje galenit.

Pored galenita, od Pb minerala lokalno u rudnom telu 2, prisutan je i mineral iz serije burnonit-zeligmanit, $\text{CuPb}(\text{Sb,As})\text{S}_3$.

Slika 6 - Kolomorfna tekstura sfalerita (sivo) koji prorasta sa baritom (belo) (back-scattered slika)

Slika 7 - Samorodno zlato iz ležišta „Čoka Marin“ (odbijena svetlost, vazduh, //N). Skraćenice: Ccp – halkopirit, Eg – enargit, Gn – galenit, Py – pirit, Sp – sfalerit

Minerali zlata i srebra su svakako ekonomski najznačajniji za ispitivano ležište. Samorodno zlato, legirano srebrom u opsegu od 10 do 20 tež.% [7] jedini je

mineral ovih plemenitih metala otkriven u ležištu „Čoka Marin“. Retko je prisutno u ležištu, u svega nekoliko uzoraka, ali koji sadrže puno zrna zlata. Samorodno zlato se javlja u zrnima veličine najčešće oko 10 μm, ređe 50-100 μm (slika 7). U Cu-piritskoj rudi javlja se na dva načina: 1) u pukotinama piritu parageneti sa bornitom i galenitom (slika 7 a); i 2) enargit-luzonitskim kristalastim agregatima (slika 7 b). U uzorcima polimetalične rude javlja se u sfaleritu, često zajedno sa galenitom (slika 7 c). S obzirom da je utvrđena prilično neravnomerna raspodela samorodnog zlata u ležištu, tj. svega nekoliko uzoraka relativno bogatih ovim mineralom, a rudne rezerve ležišta pokazuju visoke koncentracije ovih plemenitih metala, postoji mogućnost njihovog koncentrisanja u glavnim mineralima ležišta.

Srebro ne gradi sopstvene minerale u ležištu već se javlja kao primesa u mnogim mineralima, usled čega donekle pokazuje trend rasejavanja. Rezultati mikrohemijske analize [7] minerala pokazuju da je srebro prisutno u samorodnom zlatu (11-22 tež.%), zatim se javlja u piritu (do 1 tež.%), i ređe u tenantit-tetraedritu (do 0,9 tež.%), bornitu (0,2 tež.%) i sfaleritu (do 0,1 tež.%). Koncentrisanje srebra u piritu u vidu nanometarskih inkluzija [5] je naročito značajno sa ekonomskog stanovišta.

6. OPITI FLOTACIJSKE KONCENTRACIJE

Sa aspekta pripreme mineralnih sirovina može se reći da se radi o vrlo složenoj rudi koja zahteva obimna istraživanja, koja su vođena u dva pravca: mineraloška istraživanja i tehnološka istraživanja. Tehnološka ispitivanja su takođe išla u dva pravca: prvi, selektivna flotacija bakra i drugi pravac kolektivno flotiranje svih sulfida sa posebnim akcentom na iskorišćenje plemenitih metala.

Opiti selektivne flotacije bakra imali su za cilj ispitivanje mogućnosti primene ove metode flotiranja za izdvajanje grubog i kontrolnog koncentrata bakra, domeljavanje i potom trostepeno prečišćavanje grubog koncentrata bakra. S obzirom da je prethodnim ispitivanjima utvrđeno da se ksantatom ova ruda ne flotira uspešno, u daljem istraživanju korišćen je Aerophine 3418A promotor kompanije Cytec.

Po hemijskom sastavu to je natrijum diizobutil ditiofosfat, koji se može svrstati u grupu aeroflota. Primenuje se u rudnicima bakra, zlata, srebra i cinka gde doprinosi povećanju iskorišćenja metala, često uz znatno smanjenje potrošnje kolektora. Primenuje se i u flotaciji sulfida gvožđa aktiviranih bakar sulfatom. Zbog izražene kolektorske sposobnosti, pogodan je za flotiranje i sraslih zrna. Veoma brzo reaguje i ubrzava proces flotacije.

Bilans opita selektivne flotacije bakra u zatvorenom ciklusu prikazan je u tabeli 2.

Tabela 2. Rezultati flotiranja rude „Čoka Marin“, opit u zatvorenom ciklusu

Proizvodi	T %	Cu %	Au g/t	Ag g/t	R%Cu	R%Au	R%Ag	Bi%	Cd%	As%	Hg,g/t	Sb%	Fe%	S%
Ruda	100,00	1,52	3,50	9,50	100,00	100,00	100,00							
KCu	6,00	16,70	21,00	103,15	66,04	35,98	65,12	0,06	0,20	1,56	89,4	0,064	19,7	40,14
M1Cu	1,62	3,96			4,22									
M2Cu	0,62	4,17			1,71									
M3Cu	0,51	6,01			2,02									
KKCu	0,85	3,85			2,16									
J	90,40	0,40			23,85									

Dobijeni rezultati pokazuje da se selektivnim flotiranjem bakra, njegovim domeljavanjem do 95% klase -0,074 mm i potonjim trostrukim prečišćavanjem pri visokoj pH vrednosti (oko 12) može dobiti koncentrat bakra sa 16,7% Cu sa iskorišćenjem bakra oko 66%. Iskorišćenje zlata je jako nisko (oko 36%) a srebra oko 65%. Sadržaj arsena u koncentratu bakra je oko 1,56% a žive oko 89 g/t.

Arsen predstavlja jedan od najvećih problema u valorizaciji ove rude zato što su nosioci bakra minerali koji u svojoj kristalnoj rešetki imaju arsen (enargit, luzonit i sl).

Zavisnost sadržaja arsena u funkciji kvaliteta koncentrata bakra prikazan je na slici 8.

Slika 8 - Sadržaj arsena u koncentratu bakra u funkciji kvaliteta u koncentrata bakra

Tabela 3. Prognozni bilans flotiranja rude „Čoka Marin“ – kolektivna flotacija sa jednim prečišćavanjem, bez domeljavanja osnovnog koncentrata

	T %	Cu %	Au g/t	Ag g/t	Zn %	Pb %	As %	I%Cu	I%Au	I%Ag	I%Zn	I%Pb	I%As
Ruda	100.00	3.00	7.50	55.00	2.00	0.56	0.26	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Kol.konc.	44.89	5.68	13.35	88.27	4.02	0.73	0.57	85.00	79.89	72.05	90.13	58.53	98.25
Jalovina	55.11	0.82	2.74	27.90	0.36	0.42	0.01	15.00	20.11	27.95	9.87	41.47	1.75

Tabela 4. Prognozni bilans flotiranja rude „Čoka Marin“ – kolektivna flotacija sa jednim prečišćavanjem, sa domeljavanja osnovnog koncentrata

	T %	Cu %	Au g/t	Ag g/t	Zn %	Pb %	As %	I%Cu	I%Au	I%Ag	I%Zn	I%Pb	I%As
Ruda	100.00	3.00	7.50	55.00	2.00	0.56	0.26	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Kol.konc.	48.56	5.25	13.43	103.70	3.72	0.65	0.53	85.00	86.97	91.56	90.31	56.14	98.34
Jalovina	51.44	0.87	1.90	9.03	0.38	0.48	0.01	15.00	13.03	8.44	9.69	43.86	1.66

Nakon svih urađenih ispitivanja, zaključeno je da rudu iz ležišta „Čoka Marin“ treba prerađivati po šemi

Na osnovu dijagrama prikazanog na slici 8 vidi se da se povećanjem sadržaja bakra u koncentratu povećava i sadržaj arsena. Da bi se ispunio metalurški uslov, odnosno da sadržaj arsena bude ispod 1% kvalitet koncentrata treba da bude ispod 10% bakra.

Nakon detaljnih ispitivanja sprovedenih posebno na masivnoj i polimetalnoj rudi za konačnu preradu usvojena je mešavina ovih dveju ruda u odnosu 1:1. Pri tome se očekuje oko 120 000 t rude za eksploataciju sa sadržajem bakra oko 3%, zlata oko 7,5 g/t i srebra oko 55 g/t.

Urađeno je više serija opita flotiranja na ovoj mešavini. Iz rezultata ovih opita izdvajamo sledeće:

U prvoj seriji opita rađeno je izdvajanje koncentrat bakra sa jednim, dva i tri prečišćavanja i potvrdilo se da sa prečišćavanjem opada maseni udeo koncentrata, raste kvalitet i opada iskorišćenje svih elemenata, a posebno plemenitih metala. U narednim opitima pokušao se napraviti koncentrat bakra iz ove mešavine sa različitim kvalitetima uz visoko maseno učešće koncentrata, nizak kvalitet, i visoka iskorišćenja bakra i plemenitih metala. Ovaj pristup se pokazao dobrim. Dalje je ispitivana uloga domeljavanja osnovnog koncentrata bakra i konstatovano da domeljavanje povoljno utiče na iskorišćenje pre svega plemenitih metala. Na bazi ovih i ranijih opita dati su prognozni bilansi koncentracije rude „Čoka Marin“ bez i sa domeljavanjem osnovnog koncentrata, tabele 3 i 4.

koja bi uključivala domeljavanje osnovnog koncentrata i jednostepeno prečišćavanje uz mogućnost slanja

međuproizvoda na čelo procesa ili spajanjem sa definitivnom jalovinom zavisno do potrebe u procesu.

6. ZAKLJUČAK

Ruda ležišta „Čoka Marin“ je veoma složenog mineralnog sastava. Pirit, enargit i luzonit su dominantni sulfidni minerali u ovom tipu ležišta. Pored ova tri, često prisutni rudni minerali su tenantit-tetraedrit, kovelin, markasit, halkopirit, sfalerit i galenit. Finozrni kvarc je dominantan mineral jalovine, a drugi česti minerali su: barit, kaolinit/dikit, gips i alunit.

Ovako složen mineralni sastav uz veoma fino sraštavanje minerala međusobno ne omogućuje dobijanje visoko kvalitetnih selektivnih koncentrata. Zbog toga je zaključak da se za koncentraciju ove rude mora primeniti kolektivno flotiranje svih sulfida, domeljavanje osnovnog koncentrata i jednostepeno prečišćavanje. Na ovaj način se dobija koncentrat prihvatljivog kvaliteta za metaluršku preradu uz maksimalno iskorišćenje plemenitih metala.

Na bazi istraživanja uslova flotiranja predložena je tehnološka šema prerade uz izdvajanje kolektivnog koncentrata bakra sa plemenitim metalima i sa manje od 1% As čime je otvorena mogućnost valorizacije ove rude.

LITERATURA

- [1] Marinos, P and Hoek, E. 2000. GSI: A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *Proc. GeoEng 2000*. Conference, Melbourne. 1422-442.
- [2] Tesarik, D. R, Seymour, J. B, and Jones, F. M, Determination of in situ deformation modulus for cemented rockfill. *Proceedings, ISRM 2003-Technology Roadmap for Rock Mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy, p. 1209-1220, 2003.
- [3] Hermann Paus Maschinenfabrik GMBH. www.aus.de
- [4] Rocscience Inc. 2008, *Phase2 Version 7.0 - Finite Element Analysis for Excavations and Slopes*. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.
- [5] Pačevski A, Moritz R, Kouzmanov K, Marquardt K, Živković P, Cvetković Lj, Texture and composition of Pb-bearing pyrite from the Čoka Marin polymetallic deposit, Serbia, controlled by nanoscale inclusions. *Canadian Mineralogist*, 50: 1-20, 2012.
- [6] Pačevski, A Libowitzky E, Živković P, Dimitrijević R., Cvetković Lj, Copper-bearing pyrite from the Čoka Marin polymetallic deposit, Serbia: Mineral inclusions or true solid-solution? *Canadian Mineralogist* 46, 249-261, 2008.
- [7] Pačevski A. *Mineralne parageneze polimetalnog ležišta „Čoka Marin“*, doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2009.
- [8] Lazić P, *Laboratorijska ispitivanja mogućnosti koncentracije rude iz ležišta „Čoka Marin“*, Studija, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2010.

SUMMARY

VALORIZATION OF COMPLEX POLYMETALLIC ORES IN THE ČOKA MARIN DEPOSIT

The complex polymetallic deposit „Čoka Marin“ has been explored over many years. Due to its complex mineral composition and primarily a high content of precious metals it represents a particular challenge for mining experts. Over the past few years preparatory works for the ore body Čoka Marin-1 have been intensified to provide necessary conditions to excavate and prepare the ore in the Majdanpek Flotation Plant for further metallurgical processing of the collective concentrate. The new methods that were investigated to smelt the collective copper concentrate with precious metals opened new possibilities for ore valorization. This paper presents a detailed analysis of various ore excavation methods that may be applied in the „Čoka Marin“ Deposit along with the stability analysis. Further on, the results of detailed mineralogical analysis are given to show particularly the manner in which the precious metals appear. Finally, the paper presents the research results and different possibilities of ore concentration flotation processes.

Key words: polymetallic ore, rock massif, mineralogical analysis, flotation concentration