UDK: 666.952:546.54:669.015:622.7(045)=861

Branislav Čađenović, Vesna Marjanović*, Vesna Ljubojev*, Dragan Milanović**

MOGUĆNOST ISKORIŠĆENJA BAKRENCA IZ TOPIONIČKE ŠLJAKE KOD NJENOG DIREKTNOG IZLIVANJA IZ PEĆI**

Izvod

U ovom radu su prikazana laboratorijska ispitivanja uzoraka šljake iz "Depoa šljake 1" koji se nalazi u industrijskom krugu RTB-a Bor. Ispitivanjem je uočeno izdvajanje bakrenca sa visokim sadržajem bakra, kao i izdvajanje elementarnog bakra. Zbog boljih ekonomskih efekata treba razmotriti mogućnost fizičke metode koncentracije bakrenca na osnovu njegovih fizičko - hemijskih osobina.

Ključne reči: topionička šljaka, bakrenac, bakar, iskorišćenje

UVOD

U industrijskom krugu RTB Bor u Boru nalaze četiri deponije topioničke šljake. Najznačajnija i najveća deponija šljake iz plamenih peći je „Depo šljake 1“, gde je šljaka odlagana do 1997. godine. Ova deponija šljake može se posmatrati kao tehnogeno ležište mineralnih sirovina, zbog sadržaja korisnih komponenti i mogućnosti njihove valorizacije.

Na reprezentativnim uzorcima izvršenja su mineraloška, strukturna, fizička i hemijska ispitivanja topioničke šljake.

GEOLOSKE KARAKTERISTIKE TEHNOGENOG LEŽIŠTA "DEPO ŠLJAKE 1"

Tehnogeno ležište bakra "Depo šljake 1" je izometričnog oblika, čija duža osa ima orijentaciju SZ-JI i dužinu oko 700 m, a

kraća osa ima orijentaciju JZ-SI i dužinu oko 200 m. U jugoistočnom delu graniči se sa flotacijskim jalovištem, dok se na severozapadu graniči sa tehnogenim ležištem "Depo šljake 4" na kome se, od 1997. godine deponuje topionička šljaka iz plamenih peći. Severoistočnu granicu ležišta čini jalovište površinskog kopa, a jugozapadnu industrijska postrojenja TIR-a (Fabrika sumporne kiseline, topionička postrojenja i termoelektrana), te industrijska putna i železnička infrastruktura.

Geološke karakteristike tehnogenog ležišta bakra "Depo šljake 1" uslovljene su, pre svega, neposrednom podlogom na kojoj su deponovane, kao i načinom obrazovarnja deponije. Podloga deponije najvećim delom je tehnogeni materijal tj. stenska otkrivka sa površinskog kopa,

*Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

**Ovaj rad je proistekao kao rezultat projekta evidencioni broj TR 33023 „Razvoj tehnologija flotacijske prerade ruda bakra i plemenitih metala radi postizanja boljih tehnoloških rezultata“ finansiranog od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije.

prethodno deponovanju u koritu Borske reke, dok su samo malim delom neposredno ispod šljake geogene tvorevine (borski konglomerati, vulkanoklastične stene i aluvion). Deponija je stvarana sukcesivnim izlivanjem užarenog rastopa šljake, pa je u tom pogledu slična izlivima lave.[1]

ŠLJAKA IZ METALURŠKOG PROCESA TOPLJENJA ŠARŽE U TOPIONICI U BORU

Kod svih pirometalurških procesa dobijanja metala (bakra), pored osnovnog produkta (metalnog rastopa), obrazuje se i druga tečna faza (šljaka), koja sadrži nemetalične uključke i novoobrazovane okside, i predstavlja balast prilikom dobijanja čistog metala. Da bi proces dobijanja metala tekao po tehnološkom zahtevu, neophodno je da šljaka ispunjava sledeće uslove:

- šljake moraju imati dobru tečljivost, i
- da se dobro odvajaju od metala (bakrenca) i da dobro rastvaraju razne elemente koji štetno utiču na osobine metala, koji se u procesima dobijaju.

Šljake predstavljaju složene sisteme od većeg broja komponenata, a najčešće su to rastopi različitih oksida sa vrlo visokim temperaturama topljenja.

Sastav šljake veoma utiče na tok samog metalurškog procesa, kao i na kvalitet konačnog proizvoda, pa se zato značaju šljake u metalurgiji sve više posvećuje posebna pažnja.

Za objašnjenje formiranja i strukture metalurških šljaka koristi se molekularna teorija i jonska teorija obrazovanja šljake.

Osnovne komponente šljake prilikom topljenja bakarnog koncentrata su SiO_2 , FeO , Fe_2O_3 i MgO . Pored navedenih komponenti šljaka često sadrži Fe_3O_4 , Al_2O_3 , Cu_2S , i skoro redovno sitne kapljice mehanički zahvaćenog bakrenca.

Jedinjenje FeO u šljaci se najčešće nalazi u obliku fajalita $(\text{FeO})_2 \cdot \text{SiO}_2$, ali u fajalitu može biti rastvoren i višak gvožđe-oksida, kao što je slučaj u baznim šlakama.

Fajalit (Fe_2SiO_4) pripada grupi olivina koji kristališu rombično u obliku kratkostubičastih kristala ili se pojavljuju u zrnastim agregatima. Najčešće imaju karakterističnu maslinasto zelenu boju po kojoj su i dobili ime, ali mogu biti i različito obojeni od bele, svetlozelene, preko maslinaste i tamnozelene, do crne. Staklaste su sjajnosti ili masne na prelomima. Gotovo su bez cepljivosti, tvrđine 6,5-7.[4]

Šljake plamene peći prema svom hemijskom sastavu i stvarnoj rastvorljivosti bakrenca u njima, u stanju ravnoteže, trebalo bi da sadrže 0,15 do 0,25 % bakra.

To se međutim ne postiže u prvenstveno zbog značajnog prisustva mehanički uključenog bakrenca u šlakama, kao i zbog hemijski vezanog bakra u obliku oksida u slučaju kada se topi prženac.

LABARATORIJSKA ISPITIVANJA

Na pet reprezentivnih uzoraka šljake izvršene su mineraloške i laboratorijske analize. Hemijski sastav uzoraka šljake dat je u tabeli 1., a hemijski sastav reprezentativnog uzorka šljake dat je u tabeli 2.

Tabela 1. Hemijski sastav rovne šljake plamenih peći

Elementi, %	Š-1/1	Š-1/2	Š-1/3	Š-1/4	Š-1/5	Prosečni sadržaj
Cu_{uk.}	0,560	0,610	0,870	0,850	0,980	0,747
Cu_{oks.}	0,166	0,352	0,130	0,223	0,178	0,233
Cu_{sulf.}	0,394	0,258	0,740	0,617	0,800	0,511
S	0,610	0,920	0,720	0,790	1,390	0,892
Fe	37,70	34,98	37,14	37,05	37,89	36,62
Fe₂O₃	11,98	9,300	14,01	15,04	16,13	12,63
Fe₃O₄	8,760	8,540	9,680	9,38	9,290	9,030
SiO₂	34,03	34,52	34,66	33,45	33,04	34,04
Al₂O₃	4,670	6,080	5,010	3,230	5,330	5,066
Mo	0,160	0,140		0,042	0,020	0,100
Ag	3,000	4,900		3,500	3,500	3,725
Au	<0,500	0,800		0,500	0,300	0,525

Tabela 2. Hemijski sastav reprezentativnog uzorka šljake

Elementi, %	Šljaka	Analitička metoda
Cu	0,33	AAS
S	0,20	G
Fe	27,92	V
SiO₂	46,72	G
CaO	19,60	V
Al₂O₃	4,52	ICP-AES
Fe₃O₄	3,41	A- Fe ₃ O ₄

AAS-atomska apsorpciona spektrofotometrija,
 G- gravimetrija,
 A-Fe₃O₄ – analizator magnetita,
 V – volumetrija,
 ICP-AES – atomska emisija spektrometrija
 sa induktivno kuplovanom plazmom.

MINERALOŠKA ISPITIVANJA

Mineraloška determinacija topioničke šljake iz plamenih peći urađena je sa najvećeg i najznačajnijeg depoa "Depo šljake 1". Šljaku tehnogenog ležišta bakra "Depo šljake 1" karakteriše heterogenost u pogledu fizičkih, mineraloških i hemijskih osobina. To je posledica raznovrsnosti ruda, koncentrata i topitelja koji su korišćeni u procesu topljenja, kao i tehnologije koje su primenjivane u relativno dugom period (do

1943. do 1997. godine). Od reprezentativnog uzorka topioničke šljake pod oznakom Š - 1, za kvalitativno-kvantitativnu mineralošku analizu uzeta su pet uzorka za izradu rudnih preparata (Š-1/1, Š-1/2, Š-1/3, Š-1/4, Š-1/5).

Na uzetim uzorcima izvršena je determinacija mineralnog sastava i određivanje strukturno-teksturnih karakteristika minerala.

Kvalitativna mineraloška analiza rađena je pod polarizacionim mikroskopom za odbijenu svetlost u vazduhu, sa identifikacijom rudnih i nerudnih minerala. Kvantitativna mineraloška analiza rađena je metodom paralelnih profila, sa rastojanjem od 1 mm. Rastojanje između ispitivanih polja i profila pomerana su ručno. Determinacija uzoraka šljake rađena je mikroskopom za propuštenu i odbijenu svetlost, marke AXIOSKOP 40, sa uređajem za mikrofotografiju.

Na osnovu kvalitativnih mineraloških analiza utvrđen je sledeći mineralni sastav šljake: čvrsti sulfidni rastop (Cu-Fe), halkozin, pirit, bakar, halkopirit, bornit, magnetit i minerali jalovine (nemetaldni minerali), predstavljeni su staklom sa pojavom različitih eutekličkih dendrita (fajalit i dr.) koji nisu posebno određivani.

Makroskopski opis uzorka: Š-1/1

Uzorak je tamnosive boje, čeličnog sjaja. Na nekim mestima javlja se irizirajuća zeleno-plava nijansa zbog dužeg stajanja šljake na

vazduhu. Na površini uzorka vidljive su sferične šupljine, što ukazuje da je uzorak proizvod toljenja rude-šljake, slika 1.

Sl. 1. Makroskopski izgled šljake, binokular, uvećanje 50 puta

Mikroskopski opis uzorka: Š-1/1

Kvalitativnom mineraloškom analizom utvrđen je sledeći mineralni sastav: fajalit, ferit, pirit, halkozin, bornit, čvrsti sulfidni rastvor (bakrenac) i samorodni (metalni) bakar.

Osnova šljake je izrađena od fajlita i ferita u koju su uprsane sitne čestice pirita, halkopirita, halkozina, bornita, bakrenca i samorodnog (metalnog) bakra. Fajaliti su zastupljeni u vidu pritkastik kristalića. Feriti su zastiljeni u vidu skeletnih kristala

(dendriti). Fajaliti i feriti su proizvod topljenja rude – šljake. Pirit je najzastupljeniji od svih sulfidnih minerala, u vidu zrna sferičnih i nepravilnih formi. Pirit je uglavnom srastao sa jalovinom. Od minerala bakra javljaju se halkopirit, halkozin i bornit. Samorodni bakar se retko uočava u vidu sitnih žilica i zrnastih formi. Mikrofotografije uzoraka šljake prikazane su na slikama 2, 3 i 4.

Sl. 2. Sraslac halkopirita, pirit i bakrenac sa izdvajanjem elementarnog bakra, objektiv 50x, II Nikoli

Sl. 3. Sraslac halkopirita, pirit i bornita u fajalitskoj osnovi, objektiv 10x, II Nikoli

Sl. 4. Sraslac pirita i halkozina, halkozin i bakrenac, objektiv 50X, II Nikoli

Sl. 5. Bakrenac u fajalitskoj osnovi, objektiv 50X, II Nikoli

TEHNIČKI OPIS PROCESA GRANULACIJE U LABORATORIJSKIM USLOVIMA

Pod pojmom granulacije se podrazumeva naglo hlađenje tečne šljake pod pritiskom hladne vode i dobijanje šljake u vidu nepravilnih granula. Kvalitet granula zavisi od hemijskog sastava šljake, temperature šljake pre izlivanja, brzine izlivanja šljake, pritiska i količine rashladne vode.

Za laboratorijske uslove korišćena je šljaka koja je uzeta sa deponije, u komadastom obliku, različitih veličina.

Pošto takva prikupljena šljaka, koja

je bila izložena atmosferilijumu, sadrži i fizičku vlagu, pre nego što se otpočne sa njenim topljenjem neophodno je njeno sušenje. Dopremljena šljaka je podvrgnuta prirodnom sušenju, odnosno, rasprostrta je na veću površinu, kako bi eliminisali fizičku vlagu. Po završetku prirodnog sušenja uzima se više uzoraka sa različitih mesta i formira kompozitni uzorak, koji se upućuje na analizu. Hemijski sastav uzorka je prikazan u tabeli 3.

Tabela 3. Hemijski sastav uzorka

Jedinjenja-hemijski elementi	Cu	Fe ₃ O ₄	CaO	S	Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Sadržaj, %	0,68	1,754	17,26	1,07	25,69	26,75	43,76	3,89

Granulacija šljake je rađena u laboratorijskim uslovima, a za njeno izvođenje korišćen je specijalni uređaj za pravljenje granulata. Prethodno osušena i analizirana šljaka je podvrgnuta topljenju u indukcionoj peći za topljenje, snage 100 kWh, u loncu zapremine V=10 l, proizvođača ELING - Loznica. Prilikom eksperimenta istopljeno je 25 kg šljake (hemijskog sastava prikazanog u tabeli 1), temperatura pri kojoj je šljaka izlivena je

bila t=1250°C. Merenje temperature šljake obavljeno je potapajućim pirometrom.

Opis granulatora

Konstruisani specijalni granulator je mobilan i omogućava, da se šljaka naglo hladi mlaznicama, koje se nalaze na čeonj prednjoj strani rezervoara, odmah iza valjka granulatora, kome je jedan deo potopljen u rashladnu vodu. Ispod valjka je prihvatni koš sa perforiranim dnom,

koji prihvata nastale granule i koji se nakon izlivanja celokupne količine šljake iz peći vadi uz pomoć dizalice i nakon ceđenja, odlaže u korpu za granulisanu šljaku.

Tabela 4. *Hemijski sastav granulisane šljake*

Jedinjenja- hemijski elementi	Cu	S	Fe	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄
Sadržaj, %	0,33	0,20	27,92	46,72	19,60	4,52	3,41

Razlika u hemiskom sastavu, pre i posle granulisanja šljake, objašnjava se izdvajanjem posebne faze (bakrenca- Cu₂S FeS) koja je bila zarobljena u komadima šljake.

Posle izvršene granulacije ručnim odabiranjem izdvojena je mala količina bakrenca, koja je data na hemijsku analizu. Rezultati hemijske analize bakrenca dati su u tabeli 5.

Tabela 5. *Hemijski sastav bakrenca iz granulisane šljake*

Elementi, %	Šljaka	Analitička metoda
Cu	17,04	EG
Fe	36,38	V
S	15,13	S
CaO	7,40	AAS
FeO	44,02	R
Fe ₃ O ₄	6,53	A- Fe ₃ O ₄
SiO ₂	17,00	G
Al ₂ O ₃	1,63	AAS

AAS - atomska apsorpciona spektrofotometrija,

G - gravimetrija,

A-Fe₃O₄ – analizator magnetita,

V – volimetrija, EG – ,

S -Spaljivanje,

R -Računski

ZAKLJUČAK

Na osnovu hemijskih i mineroloških analiza može se zaključiti da se prilikom granulisanja šljake izdvajaju dve faze:

- siromašnija na bakru (granulisana šljaka) sa 0,33% Cu, tabela 4,
- bogatija na bakru (bakrenac) sa 17,04 % Cu, tabela 5.

U tako konstruisan granulator granulirano je 25 kg šljake. Sastav granulirane šljake dat je u tabeli 4.

U daljem našem radu razmotrićemo mogućnost dobijanja bakrenca primenom fizičkih metoda koncentracije. Veliki sadržaj bakra u bakrencu daje mogućnost povećanja ekonomske dobiti zbog povoljne cene bakra na našem i svetskom tržištu. Na osnovu fizičko - hemijskih karakteristika bakrenca treba razmotriti mogućnost primene fizičkih metoda koncentracije u cilju njegovog izdvajanja iz fajalitske osnove, kao i mogućnost eksperimentalne proizvodnje zbog unapređenja tehnoloških rezultata.

LITERATURA

- [1] D. Kržanović, R. Rajković, V. Marinković, Geološke karakteristike, modeliranje i tehničko rešenje otkopavanja tehnogenog ležišta bakra „Depo šljake 1“ u Boru, Rudarski radovi 1(2009), str. 7-17
- [2] S. Magdalinović, D. Milanović, B. Čadenović, V. Marjanović: Tehnološki postupak granuliranja šljake radi sniženja krupnoće na ulazu u flotaciju, Rudarski radovi, 3(2011), str. 101-111.
- [3] B. Čadenović, B. Drobnjaković, D. Milanović, S. Magdalinović, Novo laboratorijsko postrojenje za granuliranje izmenjenim tehnološkim postupkom izlivanja topioničke šljake, Rudarski radovi, 4(2011), str. 93-99.
- [4] www.scribd.com/doc/39205125/Minerali-i-Magmatske-Stene

UDK: 666.952:546.54:669.015:622.7(045)=20

Branislav Čađenović, Vesna Marjanović*, Vesna Ljubojev*, Dragan Milanović**

POSSIBILITIES OF USE THE COPPER MATTE FROM SMELTER SLAG IN ITS DIRECT BAKRENCA OF SMELTING SLAG IN ITS DIRECT DISCHARGE FROM FURNACE **

Abstract

This paper presents the laboratory testing of slag samples from the "Slag Depot 1", located in the industrial site of RTB Bor. Testing revealed a separation of copper matte with high copper content, as well as the separation of elemental copper. Due to the better economic effects, should be considered a possibility of physical concentration method of copper matte has to be considered, based on its physical and chemical properties.

Keywords: *smelter slag, copper matte, copper, recovery*

INTRODUCTION

There are four dumps of smelter slag in the industrial site of RTB Bor. The most important and the biggest slag dump from reverberatory furnaces is the "Slag Depot 1", where the slag was delayed until 1997. This slag dump can be considered as a technogenic deposit of mineral resources due to the content of useful components and capabilities of their recovery.

Mineralogical, structural, physical and chemical testing of smelter slag were done on representative samples.

GEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE TECHNOGENIC DEPOSIT "SLAG DEPOT 1"

Technogenic copper deposit "Slag Depot 1" has an isometric form with NW-SE

orientation of longer axis and length of approx. 700 m, and NE-SW orientation of shorter axis and length of approx. 200 m. In the southeastern part, it borders the flotation tailing dump, while in the north-west it borders the technogenic deposit "Slag Depot 4" where, since 1997, the smelter slag is delayed from the reverberatory furnaces. Northeastern border of the deposit includes the waste dump of the open pit, southwestern border includes the industrial facilities of TIR (Sulphuric Acid Plant, smelter facilities and power plants), and industrial road and rail infrastructure.

Geological characteristics of the technogenic copper deposit "Slag Depot 1" are conditioned, first of all, by the immediate surface on which they are deposited and a

* *Mining and Metallurgy Institute Bor*

** *This work is the result of the Project No. TR 33023 "Development of Technologies for Flotation Processing the Copper Ore and Precious Metals to Realize Better Technological Results", funded by the Ministry of Education and Science of the Republic of Serbia*

method of landfill formation. Surface of the landfill was mostly technogenic material, i.e. waste rock from the open pit, previously delayed in the bed of the Bor River, while the geogenic formations are only a small portion just below the slag (the Bor conglomerates, volcanic-clastic rocks and alluvium). The landfill was created by successive discharging the red-hot molten slag, and in this respect similar to the outpourings of lava. [1]

SLAG FROM THE METALLURGICAL PROCESS OF CHARGE SMELTING IN THE SMELTER IN BOR

In all pyrometallurgical processes of metal obtaining (copper), in addition to the basic product (molten metal), the second liquid phase (slag) is formed, which contains non-metallic inclusions and newly formed oxides, and presents a ballast in obtaining the pure metal. To make the process of metal obtaining according to the technological requirement, it is necessary that slag meets the following requirements:

- slag must have good flowability, and
- slag must be well separated from the metal (copper matter) and dissolve well various elements that adversely affect the properties of metals, obtained in the processes.

Slag is complex systems of a number of components; most often those are molten of various oxides with high melting temperatures.

Slag composition greatly affects the flow of metallurgical process and quality of the final product, and therefore more attention is paid to the importance of metallurgical slag.

The molecular theory and ion theory of slag formation are used for an explanation of formation and structure of metallurgical slag.

The basic components of slag during smelting of copper concentrates are: SiO_2 , FeO , Fe_2O_3 and MgO . In addition to these components, the slag often contains Fe_3O_4 , Al_2O_3 , Cu_2S , and almost always small drops mechanically affected copper matte.

Compound FeO in slag is commonly found in the form of fayalite $(\text{FeO})_2\cdot\text{SiO}_2$, but the excess iron oxide can be dissolved in fayalite, as it is the case in basic slag.

Fayalite (Fe_2SiO_4) belongs to a group of olivine that is crystallized into rhombic-shaped crystals or appears in granular aggregates. Usually they have a distinctive olive drab color on which they were named, but they may be differently colored from white, light green, through olive and dark green to black. They have glassy brightness or greasy on fractures. They are almost without tearing, hardness from 6.5 to 7. [4]

Slag of reverberatory furnace, according to its chemical composition and actual solubility of copper matter in it, in equilibrium, should contain 0.15 to 0.25% copper.

It is however not achieved, primarily due to the presence of mechanically included copper matte in the slag, as well as chemically bounded copper in the form of copper oxide when the calcine is melted.

LABORATORY TESTING

Mineralogical and laboratory analyses were carried out on five representative samples. Chemical composition of slag sample is given in Table 1, and chemical composition of representative slag sample is given in Table 2.

Table 1. Chemical composition of raw slag from reverberatory furnace

Elements, %	S-1/1	S-1/2	S-1/3	S-1/4	S-1/5	Average content
Cu total	0.560	0.610	0.870	0.850	0.980	0.747
Cu oxid.	0.166	0.352	0.130	0.223	0.178	0.233
Cu sulf.	0.394	0.258	0.740	0.617	0.800	0.511
S	0.610	0.920	0.720	0.790	1.390	0.892
Fe	37.70	34.98	37.14	37.05	37.89	36.62
Fe₂O₃	11.98	9.300	14.01	15.04	16.13	12.63
Fe₃O₄	8.760	8.540	9.680	9.38	9.290	9.030
SiO₂	34.03	34.52	34.66	33.45	33.04	34.04
Al₂O₃	4.670	6.080	5.010	3.230	5.330	5.066
Mo	0.160	0.140		0.042	0.020	0.100
Ag	3.000	4.900		3.500	3.500	3.725
Au	<0.500	0.800		0.500	0.300	0.525

Table 2. Chemical composition of a representative slag sample

Elements, %	Slag	Analytical method
Cu	0.33	AAS
S	0.20	G
Fe	27.92	V
SiO₂	46.72	G
CaO	19.60	V
Al₂O₃	4.52	ICP-AES
Fe₃O₄	3.41	A- Fe ₃ O ₄

AAS - atomic absorption spectrophotometry,

G- gravimetry,

A-Fe₃O₄ – magnetite analyzer,

V – volumetry,

ICP-AES – atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma.

MINERALOGICAL TESTING

Mineralogical determination of smelter slag from reverberatory furnaces was carried out from the biggest and most important depot the "Slag Depot 1." Slag from copper technogenic deposit the "Slag Depot 1" is characterized by heterogeneity in terms of physical, mineralogical and chemical properties. This is a consequence of various ores, concentrates and flux, used in the smelting process, and the applied technologies in a relatively long period (from 1943 to 1997).

From a representative sample of smelter slag, marked Š - 1, for the qualitative-quantitative mineralogical analysis, five samples were taken for development of mineral samples (Š-1/1, Š-1/2, Š-1/3, Š-1/4, Š-1/5).

Determination of mineral composition and structural-textural properties of minerals was carried out on taken samples.

Qualitative mineralogical analysis was carried out under the polarizing microscope for reflected light in the air, with identification of ore and non-ore minerals. Quantitative mineralogical analysis was carried out using the method of parallel profiles with distance of 1 mm. Distances between the investigated fields and sections were relocated manually. Determination the slag samples was carried out using a microscope for missed and reflected light, brand AXIOSKOP 40, with device for photomicrography.

Based on the qualitative mineralogical analysis, the following mineral composition of slag was identified: solid sulphide melt (Cu-Fe), chalcocite, pyrite, copper, chalcopyrite, bornite, magnetite and waste minerals (non-metal minerals); they were presented by a glass with appearance of various eutectic dendrites (fayalite and others) not specifically determined.

Macroscopic description of sample: Š-1/1

Sample is a dark gray with steel shine. In some places there is irritating green-blue shade due to longer standing of slag on the

air. On the sample surface, there are visible spherical cavities, indicating that the sample is a product of ore-slag smelting, Figure 1.

Fig. 1. Macroscopic view of slag, binocular, magnification 50 times

Microscopic description of sample: Š-1/1

Qualitative mineralogical analysis has identified the following mineral composition: fayalite, ferrite, pyrite, chalcocite, bornite, solid sulfide solution (copper matte) and native (metallic) copper.

The base of slag is made of fayalite and ferrite in which the tiny particles of pyrite, chalcopyrite, chalcocite, bornite, copper matte and native (metallic) copper are disseminated. Fayalites are represented in the form of rodding crystals. Ferrites are represented in the form of skeletal

crystals (dendrites). Fayalite and ferrites are the product of smelting - slag. Pyrite is the most present of all sulphide minerals in the form of spherical beads and irregular forms. Pyrite is generally intergrown to the waste. Copper minerals occur as chalcopyrite, chalcocite and bornite. Native copper is rarely observed in the form of small veins and granular forms. Microphotographies of slag samples are shown in Figures 2, 3 and 4.

Fig. 2. Intergrowth of chalcopyrite, pyrite and copper matte with separation of elemental copper, lens 50X, II Nikoli

Fig. 3. Intergrowth of chalcopyrite, pyrite and bornite in fayalitic basis, lens 10X, II Nikoli

Fig. 4. *Intergrowth of pyrite, chalcocite and copper matte, lens 50X, II Nikoli*

Fig. 5. *Copper matte in fayalitic basis, lens 50X, II Nikoli*

TECHNICAL DESCRIPTION OF THE GRANULATION PROCESS IN THE LABORATORY CONDITIONS

The term granulation includes the sudden cooling of liquid slag the pressure of cold water and slag obtaining in the form of irregular granules. The quality of granules depends on the chemical composition of slag, slag temperature prior to discharge, discharge rate of slag, pressure and quantity of cooling water.

For laboratory conditions, the slag, taken from the dump, was used in a piece form of various sizes.

Having collected such slag, exposed to the atmospheric, contains also the physical moisture, before its melting, it is necessary to dry it. The delivered slag was subjected to natural drying and spread over larger area in order to eliminate the physical moisture. Upon completion the natural drying, many samples are taken from different places and a composite sample is formed, which is sent for analysis. Chemical composition of a sample is shown in Table 3

Table 3. *Chemical composition of a sample*

Compounds – chemical elements	Cu	Fe ₃ O ₄	CaO	S	Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Content, %	0.68	1.754	17.26	1.07	25.69	26.75	43.76	3.89

Description of granulator

Slag granulation is carried out in laboratory conditions, and a special device was used to make granules. Previously dried and analyzed slag was subjected to melting in the induction furnace for melting, 100 kWh in a pot, volume $V = 10$ l, the manufacturer ELING - Loznica. During experiment, 25 kg of slag was melted (chemical composition shown in Table 1), at temperature at which the slag was discharged $t = 1250^{\circ}\text{C}$. Measuring the temperature of slag was carried out using the immersion pyrometer.

The constructed special granulator is mobile and provides the sudden cooling of slag by jets, which are located on the front part of the tank, just behind the granulator drum, with a submerged part in cooling water. A carrying the basket is below a roller with perforated bottom, which accepts the resulting granules and that after discharge the entire amount of slag from the furnace is removed with a crane, and after filtering, stored in a basket for granulated slag.

Such constructed granulator has 25 kg of granulated slag. Granulated slag com-

position is given in Table 4.

Table 4. Chemical composition of granulated slag

Compounds – chemical elements	Cu	S	Fe	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄
Content, %	0.33	0.20	27.92	46.72	19.60	4.52	3.41

Difference in chemical composition before and after granulation of slag is explained by separation of special phase (copper matte - Cu₂S FeS) that was trapped in the pieces of slag.

After carried out manual separation, a small amount of copper matte was separated and given to a chemical analysis. The results of copper matte chemical analysis are given in Table 5.

Table 5 Chemical composition of copper matte from granulated slag

Elements, %	Slag	Analytical method
Cu	17.04	EG
Fe	36.38	V
S	15.13	S
CaO	7.40	AAS
FeO	44.02	R
Fe ₃ O ₄	6.53	A- Fe ₃ O ₄
SiO ₂	17.00	G
Al ₂ O ₃	1.63	AAS

AAS – atomic absorption spectrophotometry,

G – gravimetry,

A-Fe₃O₄ – magnetite analyzer,

V – volumetry,

EG -, S – incineration, R - computational

CONCLUSION

Based on chemical and mineralogical analyses, it can be concluded that two stages are separated in slag granulation:

- low-grade on copper (granulated slag) with 0.33% Cu, Table 4,
- high-grade on copper (copper matte) with 17.4% Cu, Table 5.

In future work, the possibility of obtaining the copper matte will be considered using the physical methods of concentration. High copper content in copper matte gives the possibility of increasing the economic profit due to favorable copper price on domestic and the world market. Based on the physical-chemical characteristics of copper matte, the possibility of use the physical methods of concentration should be considered for their separation from the fayalitic basis as well as the possibility of experimental production for improving the technological results.

REFERENCES

- [1] D. Kržanović, R. Rajković, V. Marin-ković, Geological Characteristics, Modeling and Technical Solution of Mining the Technogenetic Deposit "Slag Depot 1" in Bor, Mining Engineering 1(2009), pp. 7-17;
- [2] S. Magdalinović, D. Milanović, B. Čadenović, V. Marjanović, Technological Method of Slag Granulation to Reduce the Grain-size at the Inlet of Flotation, Mining Engineering 3/2011, pp. 101-111;
- [3] B. Čadenović, B. Drobnjaković, D. Milanović, S. Magdalinović, New Laboratory Plant for Granulation by the Changed technological Method of Pouring the Smelter Slag, Mining Engineering 4(2011), pp. 93-99.
- [4] www.scribd.com/doc/39205125/Minerali-i-Magmatske-Stene