

РЕЦИКЛАЖА И ОДРЖИВИ РАЗВОЈ
UDK 628.477.7.043:622.271.4(497.11)
Научни рад

Технички факултет у Бору – Универзитет у Београду, В.Ј. 12, 19210 Бор, Србија
Катедра за минералне и рециклажне технологије
Тел. +381 30 424 555, 424 556, Фак. +381 30 421 078

**ЕКОНОМСКИ ИСПЛАТИВ, ТЕХНОЛОШКИ МОГУЋ И ЕКОЛОШКИ ОПРАВДАН
ПРОЦЕС ЗАЈЕДНИЧКЕ ПРЕРАДЕ РУДАРСКИХ ТЕХНОГЕНИХ ОТПАДА
ТОПИОНИЧКЕ ШЉАКЕ И СТАРЕ ФЛОТАЦИЈСКЕ ЈАЛОВИНЕ РТБ-А БОР**

**ECONOMICALLY COST-EFFECTIVE, TECHNOLOGICALLY POSSIBLE AND
ECOLOGICALLY JUSTIFIABLE TECHNOLOGICAL PROCESS FOR PROCESSING
MINING TECHNOLOGICAL WASTES, SMELTER SLAG AND OLD FLOTATION
TAILING FROM RTB BOR**

**Родољуб Станојловић[#], Јовица Соколовић^{*}, Зоран Штирбановић^{*},
Топлица Марјановић^{**}**

^{*}Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору,
Војске Југославије 12, 19210 Бор, Србија

^{**}РТБ Бор Група, ТИР Бор, Ђорђа Вајферта 20-22, 19210 Бор, Србија

ИЗВОД

Одрживи развој заједница од локалног до глобалног нивоа је највећи изазов 21 века. Одрживост заједница условљена је одрживошћу друштвених и привредних делатности које се обављају у истим.

Доминантан фактор одрживости и развоја привредних активности су њихова економска исплативост, технолошка могућност реализације, заснована на примени савремених научних достигнућа, као и еколошка прихватљивост истих.

Посебан допринос одрживом развоју, како привредних делатности тако и заједница је примена науке у решавању наслеђених еколошких проблема на економски исплатив начин. Решавање проблема заштите животне средине рециклажом техногених рударских отпада, топионичке шљаке и старе флотацијске јаловине, којом се на економски исплатив начин валоризују стратешке сировине, бакар, племенити метали и друго, је реалан пример, и снажна порука истраживачима о правцу будућих истраживања у овој области.

Кључне речи: економија, технологија, екологија, топионичка шљака, флотацијска јаловина.

ABSTRACT

Sustainable development of all communities, from local to global level, is the greatest challenge of the 21st century. Sustainability of communities is caused by the sustainability of social and economic activities that are performed there.

The dominant factor in the sustainability of economic activities are their economic viability, technological possibility of realization, based on the application of modern scientific achievements, as well as environmental acceptability.

A special contribution to sustainable development, to economic activities and communities is application of science in solving environmental problems that were inherited in the economic cost-effective way. Solving problems of environmental protection by recycling technological mining wastes, smelter slag and old flotation tailing, which represents economical way of valorizing the strategic raw materials, copper, precious metals and the others is a real example and a strong message to researches about direction of future investigations in this area.

Keywords: economy, technology, ecology, smelter slag, flotation tailing.

[#] Особа за контакт: rstanojlovic@tf.bor.ac.rs

УВОД

Експлоатација и прерада руде бакра у РТБ-у Бор, која датира од почетка 20. века, условљава перманентну продукцију различитих техногених отпадних сировина. Настали као нус производи различитих фаза процеса експлоатације и прераде руда и концентрата бакра, представљају велике загађиваче животне средине. Неки од техногених отпада садрже корисне компоненте, бакар и племените метале у границама економске исплативости њихове прераде.

Топионичка шљака, нус производ прераде руде и концентрата бакра, као и стара флотацијска јаловина, су неки од техногених отпада који упућују на могућност економски исплативе прераде.

Топионичка шљака, техногени отпад процеса топљења концентрата бакра, депонована у непосредној близини прерађивачких капацитета, у маси од око 16 милиона тона, у којој се налази око 120 хиљада тона бакра, као и свакодневна продукција масе, од 700 – 1000 тона, са средњим садржајем бакра од око 0,75 %, представља значајан сировински потенцијал, али и загађивач животне средине.

Флотацијска јаловина старог флотацијског јаловишта, поред тога што је перманентни загађивач земљишта, воде и ваздуха, садржи и значајне количине корисних компоненти, пре свих бакар и племените метале. Маса јаловине старог флотацијског јаловишта процењује се на око 27 милион тона, са средњим садржајем бакра од око 0,2-0,4 %, што значи да се у истом налази око 50-100 хиљада тона бакра.

Индустријска прерада топионичке шљаке у РТБ-у Бор, врши се од 2001. године, у адаптираном технолошком процесу прераде руде бакра. Поред техничких недостатака и високог степена амортизације постојећег

постројења, смањена ефикасност најважнијих фаза процеса прераде топионичке шљаке, уситњавање, класификација и флотацијска концентрација, условљена је великим разликама у физичким, хемијским, минералošким и другим карактеристикама руде бакра и топионичке шљаке.

На основу резултата, како лабораторијских тако и индустријских истраживања закључено је, да је један од најзначајнијих фактора смањене ефикасности процеса, а тиме и економичности прераде, смањена вискозност и стабилитет пулпе формиране од топионичке шљаке. Ова појава је условљена карактеристикама топионичке шљаке, које се односе на повећану густину и отпорност према уситњавању, као и на одсуство алумината и алумосиликата у облику финозрних честица малих густина. Смањена вискозност и стабилитет пулпе условили су бржу седиментацију честица шљаке у процесу млевења и класификације, као и у процесу флотирања у флотацијским машинама, што неминовно доводи до смањења ефикасности најзначајнијих фаза процеса, тиме директно условљавају мању економичност прераде овог техногеног отпада.

У раду су приказани резултати истраживања који упућују на могућност побољшања технолошке ефикасности процеса прераде топионичке шљаке, усавршавањем постојећег технолошког процеса применом оригиналних техничко-технолошких решења. Повећањем ефикасности процеса прераде, повећава се и економичност прераде овог техногеног отпада, а дислокацијом истог, са необезбеђене депоније на плански пројектовано флотацијско јаловиште трајно се решава наслеђени еколошки проблем.

ЕКОНОМСКИ АСПЕКТ ПРЕРАДЕ ТОПИОНИЧКЕ ШЉАКЕ И СТАРЕ ФЛОТАЦИЈСКЕ ЈАЛОВИНЕ

Велико интересовање истраживача, као и стручне и научне јавности изазвали су рударски техногени отпади топионичка шљака и стара флотацијска јаловина, како са становишта потенцијалних сировинских ресурса, тако и као загађивачи животне средине.

Вредност основних корисних компоненти, бакра и племенитих метала, у овим техногеним отпадним сировинама, која се мери милијардама долара, комплексност и хетерогеност самих сировина, као и постојећи, економски исплатив а недовољно ефикасан индустријски процес прераде истих, су велики изазови истраживачима у овој области.

Топионичка шљака је техногена отпадна сировина која се одликује високим садржајима основне корисне компоненте, бакра, али и племенитих метала. Просечан садржај бакра у топионичкој шљаци је 0,75%, злата 0,4 g/t и сребра 7,5 g/t, што представља 2-3 пута већи садржај, од садржаја истих компоненти у примарним рудама које се сада експлоатишу. На депонији је складирано око 16 милиона тона шљаке, са свакодневном продукцијом

нових, 700-1000 тона. Ово показује, да је у постојећим залихама овог техногеног отпада садржано око 120.000 t бакра, 6,4 t злата и 120 t сребра, као стратешких производа, веома цењених и тражених на светском тржишту, чија је тренутна вредност око **милијарду УСД**.

Просечни садржаји бакра и племенитих метала у флотацијској јаловини са старог флотацијског јаловишта су 0,2-0,4% Цу, 0,3-0,6 g/t Au и 1,3 - 2,14 g/t Ag, што је реда величине садржаја истих корисних компоненти у примарним рудама које се тренутно експлоатишу. С обзиром да се на старом флотацијском јаловишту налази око 27 милиона тона јаловине, то значи да се у постојећим залихама овог техногеног отпада налази око 54.000 t бакра, 12,15 t злата и 46,44 t сребра, чија је тренутна вредност на светским берзама око **750 милиона УСД**.

Вредности метала у овим техногеним отпадним сировинама недвосмислено упућују на потребу максималног научног и стручног ангажовања на дефинисању оптималне технологије прераде истих, са циљем остваривања највеће профитабилности процеса.

ТЕХНОЛОГИЈА ПРЕРАДЕ ТОПИОНИЧКЕ ШЉАКЕ У РТБ-у БОР

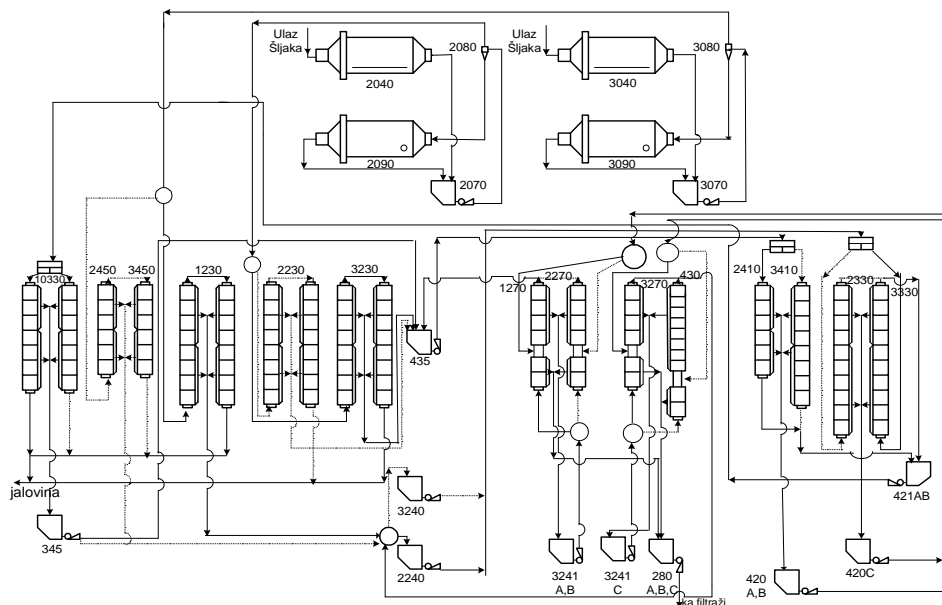
Индустријска прерада топионичке шљаке се врши у погону Флотације Бор од 2001. године. На слици 1 приказана је шема технолошког процеса прераде топионичке шљаке.

На основу резултата снимања индустријског процеса прераде топионичке шљаке и лабораторијских истраживања закључено је, да је један од најзначајнијих фактора смањења ефикасности процеса прераде, смањена вискозност и стабилитет пулпе

Смањена вискозност и стабилитет пулпе условили су бржу седиментацију чврсте фазе у процесу млевења и класификације,

као и у процесу флотирања у флотацијским машинама, што је довело до смањене ефикасности ових најзначајнијих фаза процеса, са директним утицајем на крајњу економичност прераде овог техногеног отпада.

Технолошки показатељи процеса прераде топионичке шљаке јасно указују на смањену ефикасност процеса. Капацитет прераде је далеко испод очекиваног, и износи око 80 t/h, искоришћење основне корисне компоненте, бакра, је око 40%, а садржај бакра у добијеним дефинитивним концентратима око 15%.



Слика 1. Технолошка шема млевења и флотирања топионичке шљакe у погону Флотације Бор

ТЕХНОЛОШКО УНАПРЕЂЕЊЕ ПОСТОЈЕЋЕГ ПРОЦЕСА ПРERAДЕ ТОПИОНИЧКЕ ШЉАКЕ И СТАРЕ ФЛОТАЦИЈСКЕ ЈАЛОВИНЕ

На основу резултата снимања индустријског процеса прераде топионичке шљакe и лабораторијских истраживања закључено је, да је један од најзначајнијих фактора смањења ефикасности процеса прераде, смањена вискозност и стабилитет пулпе. Ова појава условљена је карактеристикама топионичке шљакe које се односе на повећану густину и отпорност према уситњавању, као и на одсуство алумината и алумосиликата у облику финозрних честица мањих густина.

Мања стабилност и вискозитет пулпе негативно утичу на ефикасност најзначајнијих фаза процеса прераде топионичке шљакe, процесу млевења, класификације у хидроциклону и флотацијске концентрације минерала бакра и племенитих метала.

- У процесу млевења, због мале вискозности пулпе, не долази до оптималног облепљивања кугли материјалом чврсте фазе, што директно утиче на смањену

ефикасност млевења, а тиме и на повећану потрошњу енергије и челика по јединици производа млевења.

- Смањена вискозност и стабилитет пулпе у процесу класификације у хидроциклону, условљава смањену ефикасност овог технолошког процеса. Последица смањене ефикасности класификације је, да се довољно уситњене честице, за процес флотирања, уместо у прелив, дистрибуирају у песак хидроциклоне, и непотребно поново враћају у процес млевења.

Ова појава директно утиче на повећану потрошњу енергије и челика у процесу млевења, смањује капацитет прераде сировине, а преуситњене честице корисних компоненти флотирају са мањом ефикасношћу, чиме директно условљавају смањено искоришћење истих.

- У процесу флотирања, један од најзначајнијих фактора ефикасности је одржавање пулпе у суспензионом стању у

временском интервалу довољно дугом да честице корисних компоненти ефикасно флотирају. За случај пулпе мале вискозности и стабилитета, каква је пулпа формирана од топионичке шљаке, долази до брзе седиментације честица чврсте фазе, посебно оних са већим крупноћама и густинама, што доводи до смањене ефикасности процеса, односно пада искоришћења корисних компоненти.

Додавањем сировине са нижом густином, и повећаним садржајем финих честица алумосиликата, као што је флотацијска јаловина, могу се побољшати карактеристике пулпе формиране од топионичке шљаке, пре свега њена стабилност.

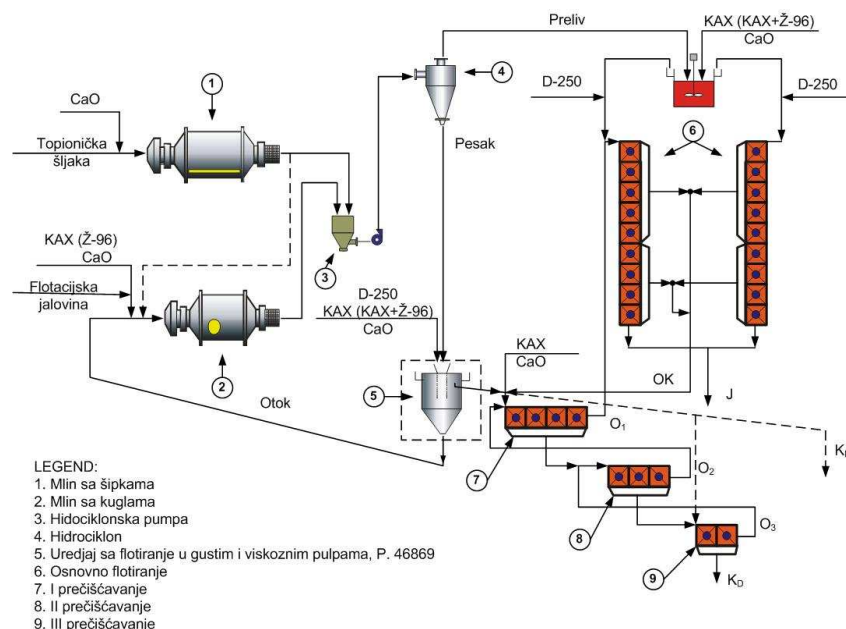
На слици 2, приказано је идејно решење процеса прераде топионичке шљаке са значајним техничко-технолошким унапређењима.

Заједничка прерада топионичке шљаке и старе флотацијске јаловине има вишеструки значај. Због карактеристика флотацијске јаловине, мање густине чврсте фазе и присуства финозрних алумината и алумосиликата, у великој мери се решавају проблеми у свим фазама процеса прераде

шљаке, који су проузроковани смањеном стабилношћу и вискозитетом пулпе.

Коришћење флотацијске јаловине, поред побољшања карактеристика пулпе, омогућава истовремено валоризацију корисних компоненти и из саме флотацијске јаловине. Садржај бабра и племенитих метала у старој флотацијској јаловини је сличан садржају истих корисних компоненти у примарним рудним сировинама.

Доградња и усавршавање постојећег технолошког процеса прераде топионичке шљаке, увођењем додатног флотирања песка хидроциклона у машини самици (П-бр. 46869), има за циљ, да се флотирањем довољно уситњених честица из песка хидроциклона, спречи њихову дистрибуцију у млин са куглама и тиме у највећој мери онемогуће негативне последице. Истраживања су показала, да се због мале ефикасности рада хидроциклона, већа маса готовог производа млевења дистрибуира у песку него преливу хидроциклона, тако да је примена машине самице за флотацију корисних компоненти из песка хидроциклона оправдана.



Слика 2. Технолошка шема заједничке прераде топионичке шљаке и флотацијске јаловине

Анализом резултата лабораторијских истраживања заједничке прераде топионичке шљаке и старе флотацијске јаловине, као и резултата лабораторијских опита флотирања песка хидроциклона, може се очекивати да ће се применом предложене

технолошке шеме искоришћење бакра повећати за око 15-20%, потрошња енергије у процесу млевења смањити за око 20-25%, као и повећати капацитет прераде за 10-15%.

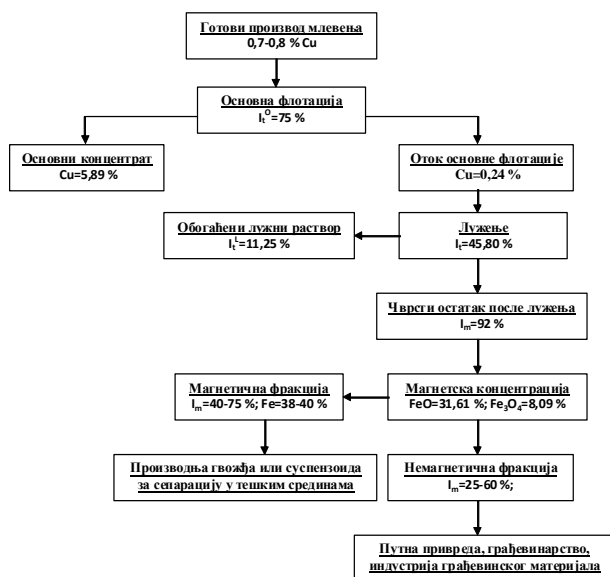
ВИЗИЈА ТЕХНОЛОГИЈЕ ПЕРАДЕ ТОПИОНИЧКЕ ШЉАКЕ БЕЗ ОСТАТКА

Сва досадашња истраживања указују да се основним технолошким процесом концентрације, флотацијском концентрацијом, у реалним индустријским условима може остварити технолошко искоришћење основне корисне компоненте, бакра, око 50-60%. С обзиром да је садржај бакра у шљаци око 0,75%, то значи да дефинитивна јаловина процеса флотирања садржи око 0,3-0,37%, односно, да се кроз јаловину трајно губи око 40-50% од укупне количине бакра садржаног у топионичкој шљаци.

Сматрамо да су овакви технолошки резултати неприхватљиви, тим пре, што се губитак бакра, племенитих метала и других корисних компоненти, дешава у оптимално уситњеном материјалу, погодном за примену других, технолошки комплементарних процеса за доискоришћење истих.

Резултати прелиминарних лабораторијских испитивања, приказани на предложеној шеми технологије за прераду топионичке шљаке без остатка, слика 3, упућују на ту могућност.

Предложено технолошко решење прераде топионичке шљаке, "технологија без остатка", представља комплементарну технологију више технолошких процеса, која упућује на технолошку могућност економски оправдане валоризације свих компоненти из ове техногене отпадне сировине. Делови предложене технологије су већ у индустријској експлоатацији, неке фазе процеса су лабораторијски доказане, док су друге на нивоу прелиминарних истраживања и идејних решења.



Слика 3. Визија технологије прераде топионичке шљаке без остатка

ЕКОЛОШКИ ЕФЕКТИ ПРЕРАДЕ ТОПИОНИЧКЕ ШЉАКЕ И СТАРЕ ФЛОТАЦИЈСКЕ ЈАЛОВИНЕ



Слика 4. Положај старог флотацијског јаловишта у односу на урбану зону града

Топионичка шљака и стара флотацијска јаловина су нус производи технолошких процеса прераде руда и концентрата бакра из периода прве половине прошлог века.

Депонија шљаке и старо флотацијско јаловиште заузимају око сто хектара, површине лоциране у непосредној близини урбане зоне града, слика 4.

Неадекватно обезбеђене, изложене атмосферским утицајима, ветру и падавинама, десетинама година загађују ваздух, земљиште, подземне и површинске воде.

Због необезбеђених, нерекултивисаних површина у летњем периоду, са истих се подиже минерална прашина велике концентрације (1–45 g/s), која сходно свом хемијском и минералошком саставу, са доминантним учешћем fine силикатне прашине и токсичним једињењима насталим

под утицајем спољашњих атмосферских и унутрашњих фактора, загађују како урбану средину града и околних насеља, тако и пољопривредно земљиште у ближој и даљој околини.

Провирне воде са јаловишта, као и воде атмосферских падавина, од настанка депоније и јаловишта продиру кроз отпадни материјал, растварају компоненте садржане у истим, пре свих метале и у облику водених раствора јона тешких метала загађују, како површинске тако и подземне воде. Ефекти лужења рударских техногених отпада, најбоље се могу констатовати у хемијским саставима вода, Борске и Кривељске реке. Садржаји јона тешких метала, као највећих загађивача у водама Борске и Кривељске реке, приказани су у табели 1.

Табела 1. Садржаји јона тешких метала у водама Борске и Кривељске реке

Јони тешких метала (mg/l)	Борска река	Кривељска река	МДК јона тешких метала по класама вода (mg/l) ⁸	
			I и II	III и IV
Бакар	15,7	16,2	0,1	0,1
Цинк	2,1	0,26	0,2	1,0
Олово	0,100	<0,010	0,05	0,1
Кадмијум	0,009	0,003	0,005	0,01
Никл	0,270	0,020	0,05	0,1
Хром	<0,010	<0,010	0,1	0,1
Арсен	0,008	<0,002	0,05	0,05
Жива	<5x10 ⁻³	<5x10 ⁻³	0,001	0,001

Очигледни пример загађења отпадним рудничким водама су Борска и Кривељска река, које се одликују тиме, да у водама истих нема живог света, чак ни микроорганизама. Приобаље ових река је потпуно стерилно, без биљног и животињског света, слика 5, а вода из бунара у ближој и даљој околини ових река на подручјима села, Кривељ, Слатина, Оштрељ, итд. је неупотребљива за коришћење у домаћинствима, чак се не

препоручује ни за употребу у пољопривреди.

Сходно претходним констатацијама, уклањањем депонованог материјала са депоније шљаке и старог флотацијског јаловишта, односно прерадом истих, и планским одлагањем у обезбеђено флотацијско јаловиште, у највећој мери би се решио постојећи еколошки проблем и учинио значајан допринос заштити животне средине.



Слика 5. Изглед приобаља Борске реке

ЗАКЉУЧАК

Топионичка шљака и флотацијска јаловина су техногене отпадне сировине настале као нус производи процеса експлоатације и прераде руде и концентрата бакра. Као такве, ове сировине садрже велике количине корисних компоненти, пре свих, бакар и племените метале.

Вредности метала у овим техногеним отпадним сировинама су јако велике и износе око 1,75 милијарди УСД, што недвосмислено упућују на потребу дефинисања оптималне технологије за њихову прераду која би обезбедила највећу економску добит.

Прерада топионичке шљаке се врши од 2001. године у погону Флотације Бор. Ова техногена отпадна сировина се прерађује у неадекватном постројењу, односно технолошком процесу пројектованом за прераду руде бакра. Оптерећена је многим потешкоћама, како због техничких недостатака и високог степена амортизације истог, тако и због великих разлика у физичким, хемијским, минералоским и другим карактеристикама између руде бакра и топионичке шљаке. Један од најзначајнијих фактора смањења ефикасности процеса прераде је смањена вискозност и стабилитет пулпе. Ова појава условљена је карактеристикама топионичке шљаке које се односе на повећану густину и отпорност према уситњавању, као и на одсуство алумината и алумосиликата у облику финозрних честица мањих густина. На постојање наведених проблема јасно указују и технолошки показатељи процеса прераде, капацитет од око 80 t/h, искоришћење бакра од око 40% и садржај бакра у добијеним дефинитивним концентратима око 15%.

Усавршавањем постојећег технолошког процеса применом оригиналних техничко-технолошких решења, могуће је повећати ефикасност процеса прераде. Додавањем сировине са нижом густином, и повећаним садржајем финих честица алумосиликата,

као што је флотацијска јаловина, могу се побољшати карактеристике пулпе формиране од топионичке шљаке, пре свега њена стабилност. Такође, усавршавањем постојећег технолошког процеса прераде топионичке шљаке, увођењем додатног флотирања песка хидроциклона у машини самици врши се значајна интензификација појединих фаза процеса прераде. Очекивани ефекти предложеног усавршења процеса били би повећање искоришћења бакра за око 15-20%, смањење потрошње енергије у процесу мљења за око 20-25%, као и повећање капацитета прераде за 10-15%.

Међутим, и поред тога што би се предложеним решењима знатно побољшао процес прераде топионичке шљаке, велике количине корисних компоненти би остале у флотацијској јаловини насталој прерадом исте. Резултати прелиминарних испитивања показују да се киселинским лужењем дефинитивне јаловине процеса флотирања може доискористити око 45% бакра из исте. Предложеним идејним решењем "технологије без остатка", која представља комплементарну технологију више процеса, указује се на реалну могућност економски оправдане валоризације свих компоненти из топионичке шљаке.

Топионичка шљака и флотацијска јаловина, поред тога што представљају значајне сировинске ресурсе, су и велики загађивачи животне средине. Депонија шљаке и старо флотацијско јаловиште су лоцирани у непосредној близини урбане зоне града. Изложене атмосферским утицајима ветра и падавина, десетинама година загађују ваздух, земљиште, подземне и површинске воде. Њиховим уклањањем, односно прерадом, као и планским одлагањем у пројектом предвиђено обезбеђено јаловиште, решио би се деценијски еколошки проблем, и учинио значајан допринос заштити животне средине.

ЗАХВАЛНОСТ

Аутори се захваљују Министарству за науку и технолошки развој за финансијску

подршку овог рада у оквиру пројекта ТР 17016.

ЛИТЕРАТУРА

1. Станојловић Р., Соколовић Ј., Штирбановић З., Миленковић А., „Заједничка прерада топионичке шљаке и старе флотацијске јаловине РБ Бор“, Рециклажа и одрживи развој 1 (1) (2008) 1–7
2. Станојловић Р., Соколовић Ј., Штирбановић З., „Допринос одрживости прераде топионичке шљаке у РТБ-у Бор усавршавањем постојећег технолошког процеса“, III Симпозијум „Рециклажне технологије и одрживи развој“, 05.10-08.10.2008. Сокобања, Србија, Зборник Радова пп.76-80.
3. Станојловић Р., Марковић З.С., Трумић М., Соколовић Ј., Штрибановић З., „Индустријски отпад РТБ-а Бор, загађивач животне средине или значајан сировински ресурс“, Прва регионална научно-стручна конференција о управљању индустријским отпадом, Копаоник, 22.-25. октобар 2007. Србија
4. Станојловић Р., Марковић З.С., Соколовић Ј., Штрибановић З., „Прерада техногеног отпада РТБ-а Бор, економски и еколошки допринос одрживом развоју,, VII Колоквијум о ПМС-у "Припрема минералних сировина и одрживи развој", 1.12.2006. Београд, Србија, Зборник Радова, пп.35-42
5. Станојловић Р., Богдановић Г., Соколовић Ј., Штирбановић З., „Могућност прераде техногене отпадне сировине-топионичке шљаке РБ-Бор без остатка“, Еколошка истина 2006, 04.06-07.06. 2006, Сокобања, Србија, Зборник Радова пп. 607-616.
6. Stanojlović R., Štirbanović Z., Sokolović J., „Wastefree technology for processing smelter slag from Bor Copper Mine“, Journal of Mining and Metallurgy 44 A (1) (2008) 44–50
7. Станојловић Р., Соколовић Ј., Штирбановић З., „Прерада топионичке шљаке РБ-Бор без остатка“, Рударски радови, 1-2/2006, пп. 63-70.
8. Правилник о опасним материјама у водама, "Службени гласник СРС", бр. 31/82, члан 136, тачка 5. закона 46/91-1827