

INSTITUT ZA RUDARSTVO I METALURGIJU BOR

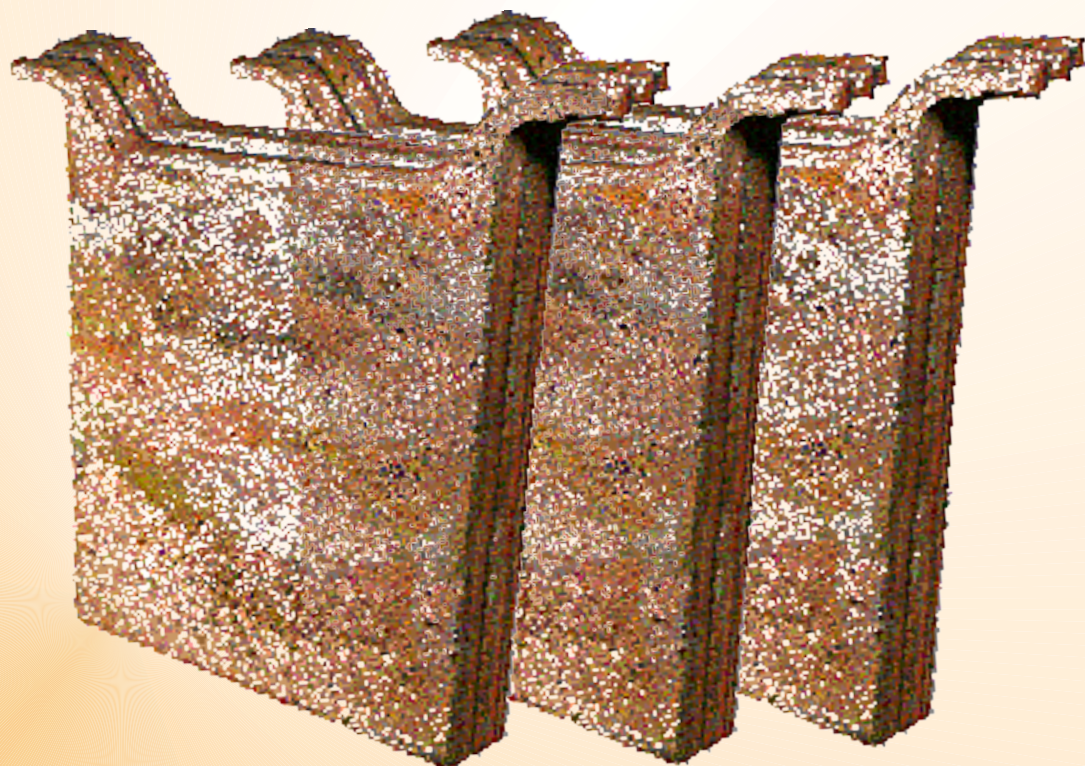


—Cu—

UDC 669.3
ISSN 0351-0212

Broj 1 Volumen 44 2019

BAKAR COPPER



BAKAR je časopis baziran na bogatoj tradiciji stručnog i naučnog rada ne samo iz oblasti dobijanja i prerade bakra, već i iz oblasti obojene i crne metalurgije, tehnologije, nanotehnologije, hemije, pripreme mineralnih sirovina, zaštite životne sredine, energetske efikasnosti, i primenjene informatike i povezanih srodnih oblasti.

Izlazi dva puta godišnje još od 1968. godine.

Glavni i odgovorni urednik

Dr Milenko Ljubojev, *naučni savetnik*,
redovni član IAS
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
E-mail: mlenko.ljubojev@irmbor.co.rs
Tel. 030/454-110

Zamenik glavnog i odgovornog urednika

Dr Ana Kostov, *naučni savetnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
E-mail: ana.kostov@irmbor.co.rs
Tel. 030/454-108

Urednik

Vesna Marjanović, *dipl.inž.*

Prevodilac

Nevenka Vukašinović, *prof.*

Tehnički urednik

Suzana Cvetković, *teh.*

Priprema za štampu

Vesna Simić, *teh.*

Štampa

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

Tiraž: 30 primeraka

Internet adresa

www.irmbor.co.rs

Izdavanje časopisa finansijski podržavaju

Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog
razvoja Republike Srbije
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor

ISSN 0351-0212

Indeksiranje časopisa u SCIndeksu i u ISI.

Nacionalni časopis kategorije M52

Izdavač

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
19210 Bor, Zeleni bulevar 35
E-mail: institut@irmbor.co.rs
Tel. 030/436-826

Sva prava zadržana.

Uređivački odbor

Dr Mile Bugarin, *naučni savetnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Prof. dr Milan Antonijević, *red. prof.*
Tehnički fakultet Bor
Prof. dr Tatjana Volkov Husović, *vanr. prof.*
Tehnološko-metalurški fakultet Beograd
Doc. dr Bojan Jokić, *docent*
Fakultet primenjenih umetnosti u Beogradu
Dr Silvana Dimitrijević, *naučni saradnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Dr Ana Kostov, *naučni savetnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Dr Lidija Mančić, *viši naučni saradnik*
Institut tehničkih nauka SANU
Dr Aleksandra Milosavljević, *viši naučni saradnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Prof. dr Duško Minić, *red. prof.*
Fakultet tehničkih nauka Kosovska Mitrovica
Dr Milanče Mitovski
RTB - Bor Grupa
Dr Miroslav Sokić, *naučni savetnik*
Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih
mineralnih sirovina Beograd
Dr Jasmina Stevanović, *naučni savetnik*
Institut za hemiju, tehnologiju i
metalurgiju Beograd
Dr Srećko Stopić
RWTH Aachen, IME Aachen, Nemačka
Dr Nadežda Talijan, *naučni savetnik*
Institut za hemiju, tehnologiju i
metalurgiju Beograd
Dr Viša Tasić, *naučni savetnik*
Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor
Prof. dr Vasyl Tomashyk, *red. prof.*
Ukrajinska nacionalna akademija nauka,
Institut za poluprovodničku fiziku Kijev
Dr Dejan Trifunović, *naučni saradnik*
Tehnološko-metalurški fakultet Beograd

COPPER is a journal based on the rich tradition of expert and scientific work not only in the field of copper production and treatment, but also in the field of non-ferrous and ferrous metallurgy, technology, nanotechnology, chemistry, mineral processing, ecology, energy efficiency, applied informatic, as well as related fields of science. Since 1968, published twice a year.

Editor-in-Chief

Ph.D. Milenko Ljubojev, *Principal Research Fellow, full member of ECS*
Mining and Metallurgy Institute Bor
E-mail: milenko.ljubojev@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-110

Co-Editor

Ph.D. Ana Kostov, *Principal Research Fellow*
Mining and Metallurgy Institute Bor
E-mail: ana.kostov@irmbor.co.rs
Phone: +38130/454-108

Editor

Vesna Marjanović, *B.Eng.*

English Translation

Nevenka Vukašinović

Technical Editor

Suzana Cvetković

Preprinting

Vesna Simić

Printed in

Mining and Metallurgy Institute Bor

Circulation: 30 copies

Web site

www.irmbor.co.rs

COPPER is financially supported by

The Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic Serbia
Mining and Metallurgy Institute Bor

ISSN 0351-0212

Journal indexing in SCIndex and ISI.

National Scientific Journal categorization M52

Published by

Mining and Metallurgy Institute Bor
19210 Bor, Zeleni bulevar 35
E-mail: institut@irmbor.co.rs
Phone: +38130/436-826

All rights reserved.

Editorial Board

Ph.D. Mile Bugarin, *Principal Research Fellow*
Mining and Metallurgy Institute Bor
Prof.Ph.D. Milan Antonijević,
Technical Faculty Bor

Prof.Ph.D. Tatjana Volkov Husović
Faculty of Technology and Metallurgy Belgrade

Ph.D. Bojan Jokić
Faculty of Applied Arts in Belgrade

Ph.D. Silvana Dimitrijević, *Research Associate*
Mining and Metallurgy Institute Bor

Ph.D. Ana Kostov, *Principal Research Fellow*
Mining and Metallurgy Institute Bor

Ph.D. Lidija Mančić, *Senior Research Associate*
Institute of Technical Science of SASA

Ph.D. Aleksandra Milosavljević,
Senior Research Associate
Mining and Metallurgy Institute Bor

Prof.Ph.D. Duško Minić
Faculty of Technical Sciences Kosovska Mitrovica

Ph.D. Milanče Mitovski
RTB – Bor Group

Ph.D. Miroslav Sokić, *Principal Research Fellow*
Institute for Technology of Nuclear and Other Raw Materials Beograd

Ph.D. Jasmina Stevanović, *Principal Research Fellow*
Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy Belgrade

Ph.D. Srećko Stopić
RWTH Aachen, IME Aachen, Germany

Ph.D. Nadežda Talijan, *Principal Research Fellow*
Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy Belgrade

Ph.D. Viša Tasić, *Principal Research Fellow*
Mining and Metallurgy Institute Bor

Prof.Ph.D. Vasyl Tomashyk,
Institute for Semiconductor Physics of National of Sciences of Ukraine Kyiv

Ph.D. Dejan Trifunović, *Research Associate*
Faculty of Technology and Metallurgy Belgrade

UDK: 669.35'5(045)=163.41

ORIGINALAN NAUČNI RAD

Oblast: Metalurško inženjerstvo

**ISPITIVANJE TOPLOTNE DIFUZIVNOSTI LEGURA Cu SA
Sn, Zn, Pb, Al I Ag**

**INVESTIGATION OF THERMAL DIFFUSIVITY OF Cu ALLOYS
WITH Sn, Zn, Pb, Al AND Ag**

Vladimir Milojković, Ljubiša Balanović, Dragan Manasijević,
Milan Gorgievski

Universitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, VJ 12 19210 Bor, Srbija

E-mail: vmilojkovicjapanac@gmail.com

Izvod

Bakar ima široku primenu u elektrotehnici za izradu provodnika zbog izvanredne električne i toplotne provodljivosti, u mašinskoj industriji, građevinarstvu, arhitekturi zbog velike plastičnosti i sposobnosti obrazovanja velikog broja tehničkih legura sa dobrim mehaničkim i tehnološkim svojstvima. Najvažniji legirajući elementi u legurama bakra su Zn, Sn, Al, Be, Ni, Mn, Si, Ag i Au. U ovom radu su prikazani rezultati termičke karakterizacije livenih legura Cu sa Zn (mesinga), Cu sa Sn (kalajne bronzе) i uz dodatak Pb (olovne bronzе) i Al (aluminijumske bronzе), kao i Rg bronzе i legure Cu sa Ag. Istraživanja koja su izvršena u okviru ovog rada bila su usmerena na merenje toplotne difuzivnosti u temperaturnom intervalu od 20–400°C, i određivanje specifičnog toplotnog kapaciteta i toplotne provodljivosti na 20°C, primenom xenon flash metode.

Ključne riječi: Legure Cu, difuzivnost, xenon flash metoda

Abstract

The copper is widely used for applications in electronic industry for making conductors due to exceptional electrical and thermal conductivity, in the mechanical engineering, construction and architecture due to high plasticity and the ability to form a large number of alloys with good mechanical and technological properties. The most important alloying elements in copper alloys are Zn, Sn, Al, Be, Ni, Mn, Si, Ag, and Au. This paper presents the results of the thermal analysis of as-cast Cu alloys with Zn (Brass), Cu with Sn (Tin Bronze) and with the addition of Pb (Lead Bronze) and Al (Aluminum Bronze), as well as Rg bronze and Cu alloys with Ag. The investigations were focused on measurements of thermal diffusivity in temperature range 20-400°C and determination of thermal conductivity and specific heat capacity at 20°C, using the Xenon flash method.

Keywords: Cu alloys, thermal diffusivity, xenon flash method

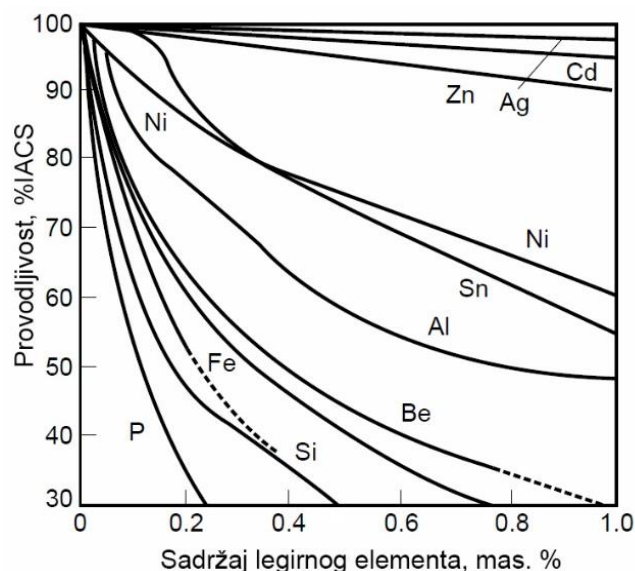
1. UVOD

Pored snage, otpornosti na zamor i sposobnosti dobre završne obrade, primarni kriterijim za izbor bakra i bakarnih legura su električna i toplotna provodljivost [1]. Više od 60% celokupne proizvodnje bakra i bakarnih legura koristi se zbog električne i toplotne provodljivosti. Najveći deo koristi se za proizvodnju žica i kablova za telekomunikaciju i elektronsku industriju, u građevinarstvu za primenu

prilikom transfera toplote, npr. za radijatore i izmjenjivače toplote i za automobilsku industriju [2]. Promene u toplotnoj provodljivosti generalno prate one u električnoj provodljivosti u skladu sa odnosom Viedemann-Franz-a [3], u kojem se navodi da je toplotna provodljivost proporcionalna proizvodu električne provodljivosti i temperature, sa određenim korekcijama [4]. Tabela 1 poredi toplotnu provodljivosti različitih metala i legura.

Tabela 1. Toplotna provodljivost različitih metala i legura [1]

Materijal	Toplotna provodljivost, W/mK
Čisto srebro	428
Čist bakar	398
C10100 (bez kiseonični, OFE)	391
C11000 (eletrilitički, ETP)	391
C10400 (bez kiseonični sa Ag)	388
C12200 (Cu-0.02P)	339
C18100 (Cu-0.04Mg-0.15Zr-0.8Cr)	324
Čisto zlato	317,9
Čisti aluminijum	247
Al 1100 (O)	222
C17410 (berilijum bakar, 0.3% Be)	208
Al 2024 (O)	193
Al 6061 (O)	180
Al 6061 (T6)	167
Čist volfram	160
Čisti magnezijum	155
Al 2024 (T6)	151
Al 7075 (T6)	130
C26000 (Cu-30Zn)	121
Al 5056 (O)	117
Čist cink	113
C51100 (Cu-4.2Sn-0.2P)	84
Čist nikl	82,9
Čisto gvožđe	80,4
Čisti kobalt	69,04
Čist kalaj	62,8
C61300 (Cu-6.8Al-2.5Fe-0.35Sn)	55
1020 ugljični čelik	51,9
C74500 (Cu-25Zn-10Ni)	45
Čisto olovo	33,6
C71500 (Cu-30Ni-0.5Fe)	29
Tip nerđajući čelik tipa 410	28,7
Čisti ugljenik	23,9
Čisti cirkonijum	21,1
Nerđajući čelik tipa 316	16,2
Čisti titan	11



Sl. 1. Uticaj sadržaja legirnog elementa na provodljivost bez kiseoničnog bakra [1]

Kao i kod drugih metalnih sistema, bakar je često legiran u cilju poboljšanja čvrstoće bez degradacije duktilnosti ili obradivosti. Međutim, legirajući elementi, takođe, umanjuju električnu i toplotnu provodljivost, u zavisnosti od legirajućeg elementa, koncentracije i lokacije u mikrostrukturi (čvrsti rastvor, precipitat, dispergovan) [6].

Izbor legure najčešće se temelji na kompromisu između čvrstoće i provodljivosti. Kada se, na primer, postavljaju dodatni zahtevi za otpornošću materijala na koroziju ili oksidaciju - kombinacije postaju složenije. Prema tome, razumevanje osobina koje zahtevaju određene aplikacije je od najveće važnosti [1]. Matematičko modeliranje sve više se koristi u procesima livenja za kontrolu procesa i proizvoda i inovacije proizvoda [7]. Pogonska snaga za takvo modeliranje je poboljšana produktivnost kroz niže troškove energije, manji gubitak otpada, poboljšani kvalitet proizvoda i konzistentnost proizvoda [8]. Postoji odsustvo pouzdanih podataka o toplotnoj provodljivosti za komercijalne materijale koji se koriste u livnoj industriji [9]. Ovo se odražava teškoćama u dobijanju tačnih eksperimentalnih vrednosti, posebno na visokim temperaturama. Nedostatak pouzdanih termofizičkih podataka predstavlja glavnu prepreku za potencijalno modeliranje tehnoloških procesa [8].

Imajući u vidu prethodno izneta uvodna razmatranja i pregled literature u oblasti, istraživanja koja su izvršena u okviru ovog rada bila su usmerena na merenja toplotne difuzivnosti i određivanje specifičnog toplotnog kapaciteta i

toplotne provodljivosti u temperaturnom intervalu od 20–400°C, primenom metode svetlosnog pulsa (Discovery Xenon Flash, DXF-500). Na osnovu rezultata eksperimentalnih istraživanja prikazanih u ovom radu može se upotpuniti slika termičkim karakteristikama, kao i stvoriti dodatan adekvatan uvid u aplikativne mogućnosti ovih legura u praksi.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

2.1. Korišćeni materijal

Uzorci bakra i bakarnih legura koji su korišćeni za ekperimentalna istraživanja u ovom radu proizvedeni su u Fabrici bakarne žice i u pogonima Livnice bakra i bakarnih legura, Rudarsko-topioničarskog basena Bor. Sva eksperimentalna istraživanja prikazana u ovom radu, vršena su na sledećim uzorcima: uzorak 1 – bakar; uzorak 2 - bakar sa srebrom (Cu-Ag); uzorak 3 - kalajna bronza CuSn12; uzorak 4 - Rg bronza Rg-5-CuSn5Pb5Zn; uzorak 5 - aluminijumska bronza CuAl10Fe3Mn2; uzorak 6 - mesing CuZn39Pb3.

2.2. Tehnologija topljenja i livenja uzoraka

Uzorci 1-2 proizvedeni su u Fabrici bakarne žice u Boru, Dip-forming postupkom. Dip - forming postupak je oblik kontinuiranog livenja koji se zasniva na provlačenju žice kroz rastopljeni bakar koji se nalazi u livnom loncu. Hladna žica apsorbuje toplotu iz rastopa i pothlađuje bakar koji kristališe i „lepi“ se na žicu. Težina očvršlog sloja bakra je 1,7 puta veća od težine polazne žice, što znači da se pri ulazu 1t polazne žice na nju „nahvata“ još 1,7 t očvršlog bakra, pa se na izlazu dobija 2,7 t žice. Bakarna žica dobijena Dip-forming postupkom odgovara po kvalitetu bezkiseoničnom bakru EB2 - Cu po standardu JUS.CD 1,008 i DIN 40500, i kao poluproizvod koristi se bez skalpiranja u elektrotehničke svrhe, za izvlačenje do najfinijih dimenzija. Kao osnovni materijal za kontinuirano livenje po Dip - forming postupku koristi se elektrolitički bakar u obliku katoda.

Uzorci 3-6 proizvedeni su u pogonima Livnice bakra i bakarnih legura. Uzorci 3-5 proizvedeni su u Livnici fazonskih odlivaka, topljenjem u naftnoj nagibnoj lončastoj peći (BT-700) i liveni u bakarnoj kokili. Uzorak 6 proizveden je u novoj livnici na liniji bronz, topljenjem u niskofrekventnoj lončastoj peći (BBC), i kontinuiranim horizontalnim livenjem – tehnikom GUSS. Uzorci su pripremani u pogonskim uslovima topljenjem katodnog bakra (99,99 %) uz dodatak primarnih legiranih elemenata ili predlegura u peći za topljenje snage 700 kW, ukupne korisne zapremine 800 kg, kapaciteta 200 kg/h. Maksimalna temperatura liva bila je 1100-1200°C, kao pokrivno sredstvo korišćen je CUPREX-1 do 0,80 % metalnog uloška. Degazacija je vršena LOGAS-om 503B, a kao dezoksidator korišćen je 0,3-0,4 fosfor-bakar sa

grafitnim zvonom. Vreme livenja bilo je 5 min u zagrejanim metalnim kokilama (min 150°C). Premaz kokila bio je vodeni na bazi grafita.

2.2.1. Uzorak 1 – Bakar

Za topljenje uzorka 1, korišćen je čist bakar (99.99 %) uz dodatak male količine fosfora (150 ppm). Dozvoljene nečistoće u uzorku su: Al (do 0,003 %), Fe (do 0,003 %), As (0,002 %), Bi (0,001 %), Pb (0,003 %), Sn (0,002 %), S (do 0,005 %). Parametri livenja bili su: temperatura likvidusa (1083 °C), temperatura livenja (1150-1200 °C), vreme livenja (5 min), temperatura kokile (min 150 °C), premaz kokile (grafit).

2.2.2. Uzorak 2 - Bakar sa srebrom CuAg

Za topljenje uzorka 2, korišćen je čist bakar (99.99 %) uz dodatak Ag (do 0,07 %). Dozvoljene nečistoće u uzorku su: Al (do 0,0008 %), Fe (do 0,01 %), As (0,0004 %), Bi (0,004 %), Pb (0,005 %), Sn (0,005 %), S (do 0,005 %). Parametri livenja bili su: temperatura likvidusa (1081 °C), temperatura livenja (1150-1200 °C), vreme livenja (5 min), temperatura kokile (min 150 °C), premaz kokile (grafit).

2.2.3. Uzorak 3 - Kalajna bronza CuSn12

Nosi oznaku CuSn12-B (CB483K), standard EN 1982:1998 [10]. Zahtevani hemijski sastav uzorka 3 bio je: Cu (85,5-88,5 %), Sn (11,2-13,0 %), Ni (do 2,0 %), Pb (do 0,6 %), P (do 0,2 %). Dozvoljene nečistoće u ovom uzorku su: Al (do 0,01 %), Fe (do 0,15 %), Zn (do 0,40 %), Mn (do 0,20 %), Sb (do 0,15 %), Si (do 0,01 %), S (do 0,05 %). Parametri livenja bili su: temperatura likvidusa (990 °C), temperatura livenja (1060-1140 °C), vreme livenja (5 min), temperatura kokile (min 150 °C), premaz kokile (grafit).

2.2.4. Uzorak 4 - Rg bronza Rg-5-CuSn5Pb5Zn5

Naziva se i Crveni liv (Rg-Bz), oznaka - Rg-5-CuSn5Zn5Pb5-B (CB491B), standard EN 1982:1998 [10]. Zahtevani hemijski sastav uzorka 4 bio je: Cu (83-86,5 %), Sn (4,2-6,0 %), Zn (4,5-6,5 %), Pb (4,2-5,8 %). Dozvoljene nečistoće: Ni (do 2,0 %), P (do 0,03 %), Al (do 0,01 %), Fe (do 0,30 %), Sb (do 0,25 %), Si (do 0,01 %), S (do 0,1 %). Parametri livenja bili su: temperatura likvidusa (1000 °C), temperatura livenja (1060-1140 °C), vreme livenja (5 min), temperatura kokile (min 150 °C), premaz kokile (grafit).

2.2.5. Uzorak 5 - Aluminijumska bronza CuAl10Fe3Mn2

Aluminijumska bronza CuAl10Fe3Mn2, nosi oznaku BR.AZMc10-3-1,5, standard GOST 493-54 [11]. Zahtevani hemijski sastav uzorka 5 bio je: Cu (ostatak %), Al (9,0-11 %), Fe (2,0-4,0 %), Mn (1,0-2,0 %). Dozvoljene nečistoće: P (do 0,01 %), Sn (do 0,10 %), Zn (do 0,50 %), Pb (do 0,03 %), Ni (do 0,50 %), Sb (do 0,002 %), Si (do 0,10 %), ostalo (do 0,75 %). Parametri livenja bili su: temperatura likvidusa (1045 °C), temperatura livenja (1150-1200°C), vreme livenja (5 min), temperatura kokile (min 150°C), premaz kokile (grafit).

2.2.6. Uzorak 6 - Mesing CuZn39Pb3

Mesing nosi oznaku CuZn39Pb3 (2.0401), standard DIN 17660/83 [12]. Zahtevani hemijski sastav uzorka 7 bio je: Cu (57-59 %), Zn (ostatak %), Pb (2,5-3,5 %). Dozvoljene nečistoće: Al (do 0,10 %), Fe (do 0,50 %), Ni (do 0,50%), Sn (do 0,40 %), ostalo (do 0,20 %). Parametri livenja bili su: temperatura likvidusa (903°C), temperatura livenja (980-1100°C), vreme livenja (5 min), temperatura kokile (min 150°C), premaz kokile (grafit).

2.3. Priprema uzoraka

Nakon topljenja uzorci su pripremljeni u obliku diska debljine 2,50 mm i prečnika 12,70 mm. Nakon rezanja, uzorci su paralelno lapirani. Pripremljeno je dva seta uzoraka od svake legure koja je ispitivana. U cilju sprečavanja rasipanja toplote i bolje apsorpcije toplote na donjoj površini uzorka [13], ispitivane gornje i donje površine uzoraka prekrivene su tankim slojem grafita od približno 20 µm. Primenom fleš metode, uzorak se zagrevao impulsom svetlosti, apsorbirana toplota na površini se prenosila kroz uzorak i promenu temperature na zadnjoj površini je detektovao IR detektor.

2.4. Ispitivanje hemijskog sastava uzoraka

Pre merenja toplotne difuzivnosti i određivanja toplotne provodljivosti ispitivanih legura bakra izvršena je provera hemijskog sastava uzoraka korišćenjem spektrometra sa optičkom emisijom SPECTROMAXx arc/spark (Analytical Instruments GmbH, Kleve, Germany) [14]. Spektrometar SPECTROMAXx (Sl. 2) se uglavnom koristi za ispitivanje materijala u livnicama i za dolazne i odlazne inspekcije u metalnoj industriji širom sveta. Određuje sve elemente koji se koriste u metalnoj industriji, uključujući analizu ugljenika, fosfora, sumpora i azota. Odlikuje se drastično smanjenim operativnim troškovima, značajno kraćim vremenom merenja i ima manje zahteve za održavanje - iako još uvek nudi izuzetnu preciznost, stabilnost i produktivnost.



Sl. 2. SPECTRO MAXx LMX06, optički emisijski spektrometar [14]

2.5. Merenje toplotne difuzivnosti i određivanje specifične topline i toplotne provodljivosti

Toplotna difuzivnost merena je primenom Parkerove fleš metode svetlosnog pulsa na uređaju „Discovery Xenon Flash, DXF-500, TA Instruments“ [15], na Tehničkom fakultetu u Boru.

Uređaj „Discovery Xenon Flash, DXF-500, TA Instruments“ (slika 3), poseduje patentirani izuzetno brz Ksenon svetlosni puls i anamorfnu višestruku svetlosnu cev. Zajedno, ova optika isporučuje svetlosni impuls neprekidnog napona i jedinstvenog intenziteta prema prednjoj površini uzorka. Ovaj uređaj ima mogućnost da ispita uzorke prečnika 12,7 i 25,4 mm u rasponu temperature od sobne do 500 °C. Upotreba velikih uzoraka smanjuje greške vezane za nehomogenost i omogućava reprezentativna merenja slabo dispergovanih kompozita. DXF platforma je dizajnirana za istraživačke i razvojne programe, kao i kontrolu proizvodnje [15].

Ključne karakteristike ovog uređaja [15]:

- Patentirani izuzetno brz Ksenon svetlosni pulsni sistem obezbeđuje 50% više energije od konkurentskih dizajna i najveći stepen tačnosti na najširem rasponu uzoraka bez obzira na debljinu ili toplotnu provodljivost;
- Omogućava merenje toplotne difuzivnost u realnom vremenu za tanke i visoko provodne materijale;
- Napredna konstrukcija peći sa naprednim otporom omogućava najbolju temperaturnu stabilnost i ujednačenost u odnosu na uzorak od sobne temperature do 500 °C i omogućava merenja na vazduhu, u inertnoj atmosferi ili u vakuumu;
- InfraRed detektor visoke osetljivosti za optimalan odnos signala i šuma, koji obezbeđuje najveću tačnost u čitavom temperaturnom opsegu;

- Dizajniran da zadovoljava industrijske standardne metode ispitivanja uključujući ASTM E1461, ASTM C714, ASTM E2585, ISO 13826, ISO 22007-Part4, ISO 18755, BS ENV 1159-2, DIN 30905 i DIN EM821 [15].



Sl. 3. Uređaj za merenje toplotne difuzivnosti - Discovery Xenon Flash, DXF-500, TA Instruments [15]

3. TEORIJSKA OSNOVA ZA ODREĐIVANJE TOPLOTNE PROVODLJIVOSTI

3.1. Toplotna difuzivost

Metoda ispitivanja se zasniva na radu Parkera i sar. 1961. godine [16]. Metoda je dobro opisana u literaturi [16-27]. Ova metoda analize je nekoliko puta usavršavana od strane Covana 1963. godine [27], Clarka i Tailora 1975. godine [23], Capea and Lehmana 1963. godine [28], Larsona i Koiama 1967 [29], Heckmana 1973 [22], i Koskia 1981. godine [18]. Pretpostavke koje su postavili Parker i sar. [16] su vrlo dobro opisali Righini i Cezairliian [24]. U izvođenju matematičkog izraza iz kog se izračunava termička difuzivnost, Parker [16] počinje od jednačine raspodele temperature u termički izolovanom i homogenom čvrstom uzorku oblika diska, uniformne debljine L , kako je navedeno u knjizi Carslava i Jaegera [30], sa naglaskom na fizičke aspekte problema:

$$T(x,t) = \frac{1}{L} \int_0^L T(x,0) dx + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2}\right) \cdot \cos \frac{n\pi x}{L} \int_0^L T(x,0) \cos \frac{n\pi x}{L} dx \quad \dots (1)$$

gde je α toplotna difuzivnost materijala. Ako je puls svetlosne energije Q trenutno i ravnomerno apsorbovan u maloj dubini na prednjoj površini uzorka $x=0$, raspodela temperature u tom trenutku data je izrazom:

$$T(x,0) = \frac{Q}{\rho \cdot C_p \cdot g}, \text{ za } 0 < x < g \quad \dots (2)$$

$$T(x,0) = 0, \text{ for } g < x < L \quad \dots (3)$$

Sa ovim inicijalnim uslovima [16], jednačina (1) može biti napisana kao:

$$T(x,t) = \frac{Q}{\rho \cdot C_p \cdot L} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos \frac{n\pi x}{L} \cdot \frac{\sin \frac{n\pi g}{L}}{\frac{n\pi g}{L}} \cdot \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2}{L^2} \cdot \alpha t\right) \right] \quad \dots (4)$$

gde je ρ gustina, a C_p je specifični toplotni kapacitet materijala. U ovoj jednačini će biti potrebno odrediti samo nekoliko termina, a pošto je g ima jako malu vrednost kod neprozirnih materijala, može se napisati:

$$\sin \frac{n\pi g}{L} \approx \frac{n\pi g}{L} \quad \dots (5)$$

Na zadnjoj površini uzorka, gde je $x=L$, promena temperature može se izraziti pomoću sledeće jednačine:

$$T(L,t) = \frac{Q}{\rho \cdot C_p \cdot L} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2}{L^2} \cdot \alpha t\right) \right] \quad \dots (6)$$

Dve bezdimenzione veličine V i ω date su jednačinama:

$$V(L,t) = \frac{T(L,t)}{T_M}, \quad \omega = \frac{\pi^2 \alpha t}{L^2} \quad \dots (7)$$

$T_M = Q / \rho \cdot C_p \cdot L$, predstavlja maksimalnu temperaturu na zadnjoj površini uzorka. Kombinacijom jednačina (6) i (7) dobijamo:

$$V = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 \varpi) \dots\dots\dots (8)$$

Gde je $V_{\omega} = 1,37$ i onda sledi:

$$\alpha = \frac{1.37 L^2}{\pi^2 t_{1/2}} = 0.1388 \frac{L^2}{t_{1/2}} \dots\dots\dots (9)$$

Ako je $t_{1/2}$ vreme potrebno da zadnja površina uzorka dostigne polovinu maksimalnog povećanja temperature, toplotna difuzivnost se može izračunati pomoću Parkerove formule (9) [16].

Ova tehnika se odlikuje kratkim vremenom merenja, potpuno je ne-destruktivna i pruža vrednosti s odličnom tačnošću i reproducibilnošću. Parkerova fleš metoda [16] podrazumeva jedinstveno zračenje preko prednje strane malih uzoraka u obliku diska sa veoma kratkim pulsom svetlosne energije. Promena temperature sa vremenom zadnje strane uzorka se snima IR senzorom sa veoma brzim termičkim odzivom, koji je hlađen tečnim azotom. Na osnovu ovog vremenski zavisnog termograma zadnje strane uzorka, toplotna difuzivnost uzorka se određuje od debljine (L) uzorka i vremena da bi se postigla polovina maksimalnog povećanja temperature ($t_{1/2}$) [16, 24], koja se uzima sa termograma.

Primjenljivost ove metode je ograničena, jer pretpostavlja idealne uslove uzorka. Da bi se dobio pogodniji metod za praktične eksperimentalne uslove, u poslednjih nekoliko godina razvijene su i druge metode koje uzimaju u obzir i toplotne gubitke, nehomogenost materijala i nejednako zagrevanje kao uticaj na konačno trajanje impulsa [16, 18, 20, 21, 23, 25, 27]. Covan [27], prvi je predložio matematički model, koji obuhvata zračenje toplotne energije sa površina uzorka nakon udara pulsom. Njegova glavna pretpostavka bila je da je impuls mnogo kraći od parametra „pola maksimalnog vremena“. Na taj način je utvrdio da je ukupna promena temperature uzorka bila manja nego kod Parkerove metode [16], kao rezultat gubitaka zračenja sa površine. Njegov model zasnovan je na zapažanju da promena temperature ne ostaje konstantna nakon maksimalne vrednosti, ali da lagano pada ispod maksimalne temperature [27]. Koski [18] je unapredio sve prethodno razmatrane tehnike uključivanjem korekcije širine impulsa u korekcije koje su odredili Covan [27] i Clark i Tailor [23]. Takođe, kombinovao je parametar gubitka toplote sa prednje strane uzorka na zadnji deo uzorka (L) za svako stanje analize Clark i Tailor [23], kao i Covanove analize [27].

Za većinu čvrstih materijala u opsegu temperature od sobne temperature do preko 1000 K, toplotna provodljivost se dobija kao produkt toplotne difuzivnosti (α), specifičnog toplotnog kapaciteta (C_p) i gustine (ρ) [16, 18, 20, 23, 25-27, 31]. Jasno je da su prethodna znanja o ρ i C_p vitalna za izračunavanje toplotne provodljivosti. Gustina se može odrediti iz dimenzija uzorka i njegove mase, ali određivanje specifičnog toplotnog kapaciteta je dosta komplikovanije.

3.2. Specifični toplotni kapacitet

Specifični toplotni kapacitet materijala definisan je kao količina energije koja je potrebna za podizanje jedinične mase materijala za jednu jedinicu temperature pri stalnom pritisku i dat je jednačinom:

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta T} \dots\dots\dots (10)$$

gde je C_p specifičan toplotni kapacitet (J/kgK), m je masa (kg), ΔT je promena temperature i Q je količina energije (J).

Za potpuno homogene materijale, specifični toplotni kapacitet se može odrediti pomoću diferencijalno skenirajuće kalorimetrije. Veliko olakšanje i poboljšanje postignuto je uvođenjem višestrukih sistema za merenje toplotne difuzivnosti uzoraka pri čemu se specifični toplotni kapacitet za nepoznate materijale može dobiti upoređivanjem porasta temperature uzorka sa porastom temperature referentnog uzorka poznate specifične toplotne, koji su testirani jedan pored drugog u istom diferencijalnom modu, odnosno pri istim uslovima [17].

3.3. Toplotna provodljivost

Za homogene materijale toplotna provodljivost ispitivanog uzorke nakon merenja toplotne difuzivnosti i specifičnog toplotnog kapaciteta, kao što je gore opisano, može se izračunati korišćenjem jednačine koje je dao Parker [16]:

$$\lambda = \alpha \cdot \rho \cdot C_p \dots\dots\dots (11)$$

gde je: λ toplotna provodljivost (W/mK), α je toplotna difuzivnost (m^2/s), ρ je gustina (kg/m), a C_p je specifični toplotni kapacitet (J/kgK).

4. REZULTATI I DISKUSIJA

4.1. Ispitivanje hemijskog sastav uzoraka

U sledećim tabelama (2-7) izvršeno je poređenje određenog hemijskog sastava uzoraka pre topljenja i dobijenog hemijskog sastava uzoraka nakon topljenja tj. uzoraka koji su ispitivani u ovom radu.

Tabela 2. Hemijski sastav uzorka 1 - Bakar

Metal	Odreden sastav pre topljenja, %	Sastav ispitivanih uzoraka, %
Cu	99,99	99,9
Metal	Dozvoljene nečistoće, %	Prisutne nečistoće, %
<i>P</i>	150 ppm	0,0005
<i>Al</i>	do 0,003	0,001
<i>Fe</i>	do 0,003	0,003
<i>As</i>	0,002	0,0008
<i>Bi</i>	0,001	0,0009
<i>Pb</i>	0,003	0,001
<i>Sn</i>	0,002	0,0006
<i>S</i>	do 0,005	0,002
Ostalo		0,0902

Tabela 3. Hemijski sastav uzorka 2 - bakar sa srebrom (Cu-Ag)

Metal	Odreden sastav pre topljenja %	Sastav ispitivanih uzoraka %
Cu	99,9	99,9
Ag	do 0,07	0,032
Metal	Dozvoljene nečistoće, %	Prisutne nečistoće, %
<i>Al</i>	do 0,001	0,0008
<i>Fe</i>	do 0,012	0,01
<i>As</i>	0,0005	0,0004
<i>Bi</i>	0,004	0,002
<i>Pb</i>	0,005	0,003
<i>Sn</i>	0,005	0,004
<i>S</i>	do 0,005	0,003

Tabela 4. Hemijski sastav uzorka 3 - kalajna bronza CuSn12

Metal	Odreden sastav pre topljenja %	Sastav ispitivanih uzoraka %
Cu	85,5-88,5	88,1
Sn	11,2-13,0	11,45
Metal	Dozvoljene nečistoće, %	Prisutne nečistoće, %
<i>Ni</i>	do 2,0	0,05
<i>Pb</i>	do 0,6	0,16
<i>P</i>	do 0,2	0,019
<i>Al</i>	do 0,01	0,0005
<i>Fe</i>	do 0,15	0,011
<i>Zn</i>	do 0,40	0,07
<i>Mn</i>	do 0,20	0,0002
<i>Sb</i>	do 0,15	0,039
<i>Si</i>	do 0,01	0,0006
<i>S</i>	do 0,05	0,021
Ostalo		0,0787

Tabela 5. Hemijski sastav uzorka 4 - Rg bronza Rg-5-CuSn5Pb5Zn5

Metal	Odreden sastav pre topljenja %	Sastav ispitivanih uzoraka %
Cu	83-86,5	85,7
Sn	4,2-6,0	4,7
Zn	4,5-6,5	5,4
Pb	4,2-5,8	3,76
Metal	Dozvoljene nečistoće, %	Prisutne nečistoće, %
Ni	do 2,0	0,15
P	do 0,03	0,003
Al	do 0,01	0,0005
Fe	do 0,30	0,092
Sb	do 0,25	0,074
Si	do 0,01	0,0006
S	do 0,1	0,027
Ostalo		0,0929

Tabela 6. Hemijski sastav uzorka 5 - aluminijumska bronza CuAl10Fe3Mn2

Metal	Odreden sastav pre topljenja %	Sastav ispitivanih uzoraka %
Cu	ostatak	85,4
Al	9,0-11	9,66
Fe	2,0-4,0	2,75
Mn	1,0-2,0	1,79
Metal	Dozvoljene nečistoće, %	Prisutne nečistoće, %
P	do 0,01	0,046
Sn	do 0,10	0,024
Zn	do 0,50	0,072
Pb	do 0,03	0,057
Ni	do 0,50	0,008
Sb	do 0,002	0,019
Si	do 0,10	0,025
Ostalo	do 0,75	
Ostalo		0,149

Tabela 7. Hemijski sastav uzorka 6 - Mesing CuZn39Pb3

Metal	Odreden sastav pre topljenja %	Sastav ispitivanih uzoraka %
Cu	57-59	57.9
Zn	ostatak	38.96
Pb	2,5-3,5	2.73
Metal	Dozvoljene nečistoće, %	Prisutne nečistoće, %
Al	do 0,10	0,0005
Fe	do 0,50	0,16
Ni	do 0,50	0,035
Sn	do 0,40	0,13
Ostalo	do 0,20	
Ostalo		0,0845

Hemijski sastav ispitivanih uzoraka u potpunost zadovoljava standarde po kojima su rađeni [10-12], a takođe prisutne nečistoće u uzorcima nalaze se u granicama dozvoljenih vrednosti, što se može videti u prethodnim tabelama za svaki uzorak pojedinačno.

4.2. Rezultati merenja toplotne difuzivnosti

Tabela 8 ilustruje dobijene rezultate toplotne difuzivnosti za ispitivane uzorke u temperaturnom opsegu od 20-400°C, dok su u tabelama 9 i 10 prikazane dobijene vrednosti specifični toplotni kapacitet i toplotni provodljivost na 20°C.

Tabela 8. Dobijeni rezultati toplotne difuzivnosti za ispitivane uzorake

Temperatura (°C)	Toplotna difuzivnost (cm ² /s)					
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	Uzorak 5	Uzorak 6
20	1,1897	1,1554	0,1565	0,345	0,3234	0,2706
100	1,1656	1,1131	0,1831	0,379	0,3533	0,3090
200	1,1171	1,0715	0,2097	0,4083	0,3840	0,3491
300	1,0756	1,042	0,2317	0,4172	0,3909	0,3783
400	1,0341	1,0115	0,2490	0,3975	0,3719	0,3978

Tabela 9. Dobijeni rezultati specifičnog toplotnog kapaciteta za ispitivane uzorake

Temperatura (°C)	Specifični toplotni kapacitet (J/(kg·K))					
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	Uzorak 5	Uzorak 6
20	380,6273	376,6273	352,2769	330,994	394,8010	350,9129

Tabela 10. Dobijeni rezultati toplotna provodljivost za ispitivane uzorake na 20°C

Temperatura (°C)	Toplotna provodljivost (W/(m·K))					
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	Uzorak 5	Uzorak 6
20	385,6505	388,6505	48,178	102,8489	91,0871	81,2841

Toplotna difuzivnosti je najveća na sobnoj temperaturi i iznosi 1,1897 cm²/s. Poznavajući podatke za čist bakar na 20°C da je toplotna difuzivnost 1,126 cm²/s i specifična toplota 383 J/kg·K, dolazimo do zaključka da čist bakar poseduje bolju toplotnu provodljivost od svih ispitivanih uzoraka.

Legura bakra se srebrom dizajnirana je za povećanu termičku stabilnost. Dodavanje srebra čistom bakru značajno podiže njegovu temperaturu omekšavanje sa vrlo malim efektom na električnu i toplotnu provodljivost. Srebro, takođe, poboljšava mehanička svojstva, posebno otpornost na puzanje. Zbog toga su ove legure poželjne kada je potrebna veća otpornost na omekšavanje (kao u komutatorima) ili kada se očekuje da se materijal dugo zadržava na naponima na povišenim radnim temperaturama (kao kod velikih alternatora i motora).

Iz tabele 10 može se videti da je toplotna provodljivost slična kao i za čist bakar, najveća je na sobnoj temperaturi $388 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ i sa povećanjem temperature opada. Takođe, može se videti i dobro slaganje dobijenih vrednosti sa vrednostima iz literature [32], za leguru CuAg0.04 toplotna provodljivost se kreće od $377\text{--}388 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, dok je specifični toplotni kapacitet $385 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$.

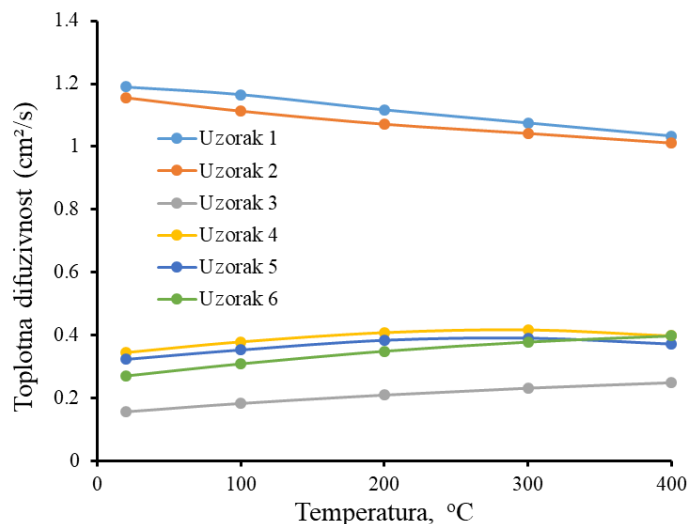
Toplotna provodljivost čistog kalaja je $62,8 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Kod kalajne bronzе dobijene su jako niske vrednosti toplotne provodljivosti, na 20°C od samo $48 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, što se moglo i očekivati jer je uticaj kalaja jako veliki. Dobijene vrednosti su niže i u poređenju sa literaturnim podacima za leguru sa 12 mas% Sn, na 20°C koja iznosi $54 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ [33].

Toplotna provodljivost Rg-5 bronzе je nešto veća od kalajne bronzе, na 20°C , i iznosi $102 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Iz tabele možemo zaključiti da provodljivost i specifični toplotni kapacitet raste sa porastom temperature, dok difuzivnost raste sve do 301°C .

Iako je toplotna provodljivost čistog aluminijuma dosta veća $247 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, veliki uticaj ima gvožđe sa $80 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Kod ove bronzе dobijene su isto niske vrednosti toplotne provodljivosti, na 20°C od samo $91 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Dobijene vrednosti su više u poređenju sa literaturnim podacima za leguru istog sastava, i na 20°C ona iznosi $54 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ [33].

Toplotne provodljivosti čistog cinka na 20°C je $113 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, a olova $33 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Kod mesinga dobijene su male vrednosti toplotne provodljivosti, na 20°C iznosi $81 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, zbog uticaja legiranih elemenata naročito olova.

Na slici 4 predstavljene su zavisnosti toplotne difuzivnosti od temperature za ispitivane uzorke.



Sl. 4. Zavisnost toplotne difuzivnosti od temperature za ispitivane uzorke

Svi dodaci čistom bakru smanjuju njegovu difuzivnost, u zavisnosti od elementa i količine u čvrstom rastvoru. Postoji kumulativni efekat kada se dodaje više od jednog elementa. Pad provodljivosti prouzrokovan je dodatkom najčešće korišćenih legirajućih elemenata. Jako štetne efekte imaju kalaj i gvožđe i relativno blagi padovi uzrokovani dodatkom cinka, dok dodatak srebra nema štetan uticaj.

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata dobijenih merenjem toplotne difuzivnosti i određivanje specifične toplote i toplotne provodljivosti uzoraka bakra i bakarnih legura, mogu se izvesti sledeći zaključci: Provera hemijskog sastava uzoraka korišćenjem spektrometra sa optičkom emisijom pokazala je da ispitivani uzorci u potpunosti zadovoljavaju standarde po kojima su rađeni, a takođe prisutne nečistoće u uzorcima nalaze se u granicama dozvoljenih vrednosti. Određena je zavisnost toplotne difuzivnosti od temperature u temperaturnom intervalu od 20 do 400°C i proračunate vrednosti specifičnog toplotnog kapaciteta i toplotne provodljivosti na 20°C. Na osnovu zavisnosti ispitivanih termičkih karakteristika, može se zaključiti da svi dodaci čistom bakru smanjuju njegovu provodljivost, u zavisnosti od elementa i njegove količine. Nastaje kumulativni efekat kada se dodaje više od jednog elementa. Pad provodljivosti prouzrokovan je dodatkom najčešće korišćenih legirajućih elemenata. Jako štetne efekte imaju kalaj i gvožđe i relativno blagi padovi uzrokovani dodatkom cinka, dok dodatak srebra nema štetan uticaj.

LITERATURA

- [1] J.R. Davis, A.S.M.I.H. Committee, Copper and Copper Alloys, (ASM International, 2001).
- [2] R.N. Wright, Chapter 13 - Relevant Aspects of Copper and Copper Alloy Metallurgy, in: Wire Technology (Second Edition), (Butterworth-Heinemann, Oxford, 2016), pp.177-200.
- [3] S. Aksöz, E. Öztürk, N. Maraşlı, The measurement of thermal conductivity variation with temperature for solid materials. 46, (1), 161-170 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.06.003>
- [4] G. Shuai, M. Zhang, Progress in high-strength and high-conductivity copper alloys and copper base composites. 25, (9), 534-537 (2005).
- [5] Anon, Copper and Copper Alloys. ASTM Book ASTM Stand, (pt 6), (1979).
- [6] W. Mahler, K.F. Zimmermann, Soldering of Copper and Copper Alloys. Metall 39, (5), 426-428 (1985) German.
- [7] Z. Suszyński, M. Maliński, L. Bychto, Thermal parameters measurement method of electronics materials. 21, (3), 424-433 (1998). 10.1109/95.725206
- [8] B.J. Monaghan, J.G.J. Neale, L. Chapman, Some thermal properties of a copper-tin alloy. 20, (4), 1051-1060 (1999). 10.1023/A:1022694518254
- [9] W. Pan, F. Yi, Y. Zhu, S. Meng, Identification of temperature-dependent thermal conductivity and experimental verification. 27, (7), (2016). 10.1088/0957-0233/27/7/075005
- [10] EN 1982 Copper and copper alloys - Ingots and castings, in: German version EN 1982, 1998-12).
- [11] ГОСТ 493-54 Бронзы безоловянные. Марки, in: Госстандарт СССР, 1954).
- [12] DIN 17660-1, Wrought copper alloys; copper-zinc alloys; (brass); (special brass);, in: German version EN 1982, 1983-12).
- [13] J. Wilzer, F. Lüdtke, S. Weber, W. Theisen, The influence of heat treatment and resulting microstructures on the thermophysical properties of martensitic steels. 48, (24), 8483-8492 (2013). 10.1007/s10853-013-7665-2
- [14] SPECTRO MAXx LMX06, arc/spark OES - Optical Emission Spectrometry, <https://www.spectro.com/products/optical-emission-spectroscopy/spectromaxx-metal-analyzer>, Accessed on: 20.05.2018
- [15] Discovery Xenon Flash DXF 500, TA Instruments, <http://www.tainstruments.com/dxf-500/>, Accessed on: 20.05.2018
- [16] W.J. Parker, R.J. Jenkins, C.P. Butler, G.L. Abbott, Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity. 32, (9), 1679-1684 (1961). 10.1063/1.1728417

-
- [17] P.S. Gaal, M. A. Thermitus, D.E. Stroe, Thermal conductivity measurements using the flash method. 78, (1), 185-189 (2004). 10.1023/b:jtan.0000042166.64587.33
 - [18] J.A. Koski, Improved Data Reduction Methods for Laser Pulse Diffusivity Determination with the Use of Minicomputers, Eighth Symp Thermophysical Prop, 1981, New York, (Ed. by J.V. Sengers), Amer. Soc. Mech. Eng.
 - [19] R.E. Taylor, Heat Pulse Diffusivity Measurements. 43, 11 (1979).
 - [20] A. Degiovanni, Diffusivité et méthode flash. 185 420-441 (1977).
 - [21] H.J. Lee, R.E. Taylor, Determination of Thermophysical Properties of Layered Composites by Flash Method, in: P.G. Klemens, T.K. Chu (Eds.) Thermal Conductivity 14, (Springer US, Boston, MA, 1976), pp.423-434.
 - [22] R.C. Heckman, Error Analysis of the Flash Thermal Diffusivity Technique, in: P.G. Klemens, T.K. Chu (Eds.) Thermal Conductivity 14, (Springer US, Boston, MA, 1976), pp.491-498.
 - [23] L.M. Clark Iii, R.E. Taylor, Radiation loss in the flash method for thermal diffusivity. 46, (2), 714-719 (1975). 10.1063/1.321635
 - [24] F. Righini, A. Cezairliyan, Pulse Method of Thermal Diffusivity Measurements, A Review. 5, 481-501 (1973).
 - [25] A.B. Donaldson, Radial conduction effects in the pulse method of measuring thermal diffusivity. 43, (10), 4226-4228 (1972). 10.1063/1.1660899
 - [26] D.A. Watt, Theory of thermal diffusivity by pulse technique. 17, (2), 231-240 (1966). 10.1088/0508-3443/17/2/311
 - [27] R.D. Cowan, Pulse method of measuring thermal diffusivity at high temperatures. 34, (4), 926-927 (1963). 10.1063/1.1729564
 - [28] J.A. Cape, G.W. Lehman, Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity. 34, (7), 1909-1913 (1963). 10.1063/1.1729711
 - [29] K.B. Larson, K. Koyama, Measurement by the flash method of thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity in two-layer composite samples. 39, (9), 4408-4416 (1968). 10.1063/1.1656985
 - [30] H.S. Carslaw, J.C. Jaeger, Conduction of Heat in Solids, (Clarendon Press, 1986).
 - [31] M. Akoshima, H. Abe, T. Baba, Development of Reference Materials for Thermal-Diffusivity Measurements by the Flash Method. 36, (12), 3272-3287 (2015). 10.1007/s10765-015-1996-y
 - [32] EN: CW011A, CR011A, UNS: C11400, Silver-bearing tough pitch Copper, <http://www.matweb.com>, Accessed on: 20.05.2018
 - [33] ASTM B505 / B505M-18, Standard Specification for Copper Alloy Continuous Castings, ASTM International, West nshohocken, PA, 2018, www.astm.org, Accessed on: 20.05.2018

UDK: 628.31:541.183(045)=163.41

ORIGINALAN NAUČNI RAD

Oblast: Bio-hemijska tehnologija

**PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA SAVREMENIM METODAMA
BIOSORPCIJE I FITOREMEDIJACIJOM**

**WASTE WATER PURIFYING WITH CONTEMPORARY
BIOSORPTION METHODS AND FITOREMEDIATION**

Vesna Krstić^{1,2}, Danijela Simonović¹, Stefan Đorđievski¹, Branka Pešovski¹,
Tamara Urošević¹, Biserka Trumić¹, Zorica Sovrlić¹

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju, Zeleni bulevar 35, 19210 Bor

²Univerzitet u Beogradu, Tehnički fakultet u Boru, VJ 12, 19210 Bor

E-mail: vesna.krstic@irmbor.co.rs

Izvod

Jedan od najvećih problema, koji se javlja kao posledica urbanizacije i ubrzanog razvoja industrije, jeste zagađenje životne sredine. Velike količine organskog, neorganskog i nuklearnog otpada kao proizvod ljudske aktivnosti, odlaze se svake godine u okolinu, usled čega u zemlju, vazduh i vodu dospevaju neorganski, organski i radioaktivni polutanti. Voda je jedna od najrasprostranjenijih prirodnih resursa i osnovni je preduslov za život na Zemlji. Čiste vode, koja se mogu upotrebiti za piće, je sve manje, jer se usled prirodnih procesa ili ljudske aktivnosti, narušavaju prirodni odnosi koji vladaju u njoj, pa voda postaje zagađena. Šteta koju čoveku nanose zagađene vode ispoljavaju se u vidu bolesti, prirodnih nepogoda ili ugrožavanja životne sredine. Iz tog razloga, u ovom radu će se razmatrati mogućnosti prečišćavanja otpadnih voda biosorbentima i fitoremedijacijom. Rezultati su pokazali da su biosorbenti i fitoremedijacija adekvatne mogućnosti za prečišćavanje otpadnih voda od teških metala, radi zaštite voda kao životnog resursa.

Ključne reči: voda, prečišćavanje, teški metali, biosorbenti, fitoremedijacija

Abstract

One of the biggest problems, which arises as a result of urbanization and accelerated development of industry, is environmental pollution. Large quantities of organic, inorganic and nuclear waste as a product of human activity are disposed of each year in the environment, resulting in inorganic, organic and radioactive pollutants coming to soil, air and water. Water is one of the most widespread natural resources and the basic precondition for the life on Earth. Quantity of clean water, which can be used for drinking, is getting smaller, because natural processes or human activity violate the natural relationships that rule in it, so water becomes polluted. The damage caused to people by contaminated water is expressed in the form of diseases, natural disasters or endangering the environment. For this reason, this paper will consider the possibilities of purification of wastewater with biosorbents and phytoremediation. The results showed that biosorbents and phytoremediation were adequate to purify waste water from heavy metals in order to protect water as a living resource.

Keywords: water, purification, heavy metals, biosorbents, phytoremediation

1. UVOD

Pojam *prirodni resursi* obuhvata sve ono što potiče od prirode i predstavlja nacionalno bogatstvo jedne zemlje i ima upotrebnu vrednost. Prirodni resursi su definisani kao navike i potrebe čoveka. Direktnu upotrebnu vrednost imaju mineralne sirovine, vode, šume, zemljišta, a indirektnu upotrebnu vrednost imaju klima i reljef, jer predstavljaju uslove za razvoj nekih drugih ekonomskih delatnosti [1]. Sinonim za prirodno bogatstvo je prirodni potencijal, koji je znatno širi termin i obuhvata sve prirodne izvore. Oni označavaju sva materijalna dobra koja čovek koristi, kao što su: rude, šume, vode, biodiverzitet, klima i reljef. Kada čovek počne da koristi ova dobra ona postaju resurs koji imaju svoju ekonomsku vrednost. Voda je jedan od važnih prirodnih resursa, bez koje nema života na zemlji. Obzirom na industrializaciju kao pokretača ekonomskog razvoja svake države, veliki broj naučnika širom sveta sreće se sa sličnim problemima zagađenosti i radi na iznalažanju efikasnijih i jeftinijih metoda za prečišćavanje otpadnih voda.

Otpadnom vodom se smatra svaka voda iskorišćena za neku namenu, jer se pri tome u manjoj ili većoj meri, menjaju njene karakteristike. Prisustvo mnogih polutanata u površinskim i podzemnim vodama pripisuje se ispuštanju neprečišćenih komunalnih i industrijskih otpadnih voda u vodene u vodotokove. Česta primena đubriva i pesticida u poljoprivredi je takođe značajan faktor koji doprinosi zagađenju. Stoga, Çeçen i Aktaş [2] su ukazali na to da površinske i podzemne vode mogu sadržati mnogobrojna organska jedinjenja poput fenola, pesticida, herbicida, alifatičnih i aromatičnih ugljovodonika i njihovih hlorsanih oblika, boja, organskih sumpornih jedinjenja, etara, amina, nitro jedinjenja, itd. U otpadnim vodama se pored ovih mogu naći i mnoge druge supstance, među njima su teški metali i retke zemlje. Metali su važni elementi za sve aerobne i većinu anaerobnih organizama, ali je dokazano da velike količine hroma, nikla, bakra, olova, kadmijuma, žive i cinka u otpadnim vodama, mogu ozbiljno naštetiti životnoj sredini i zdravlju ljudi. U životnoj sredini se mogu pojaviti u elementarnom obliku ili u obliku organskih ili neorganskih jedinjenja kao posledica prirodnih procesa. Nagajyoti i sar. [3] su naglasili da su polutanti u najvećoj meri prisutni u zemljištu i vodenim ekosistemima, a u nešto manjoj meri u vazduhu u obliku isparenja.

Mnoge razvijene zemlje donele su strogu zakonsku regulativu vezanu za ispuštanje otpadnih voda u okolinu, koje podrazumevaju prethodnu obradu i smanjenje količina zagađujućih materija u otpadnoj vodi pre samog ispuštanja u vodotokove. Među tehnikama koje se primenjuju za uklanjanje teških metala iz vode, dobro se pokazala adsorpcija zbog jednostavnosti i visoke efikasnosti u kratkom vremenskom periodu [4]. Za ovu namenu komercijalno su dostupni

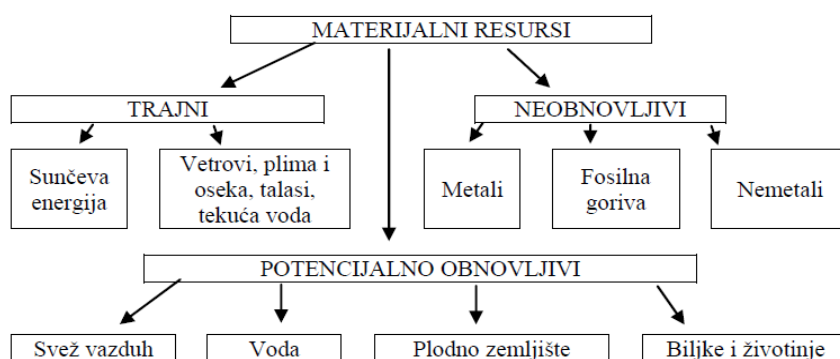
zeoliti, sintetički polimerni adsorbenti i aktivni ugalj. Çeçen i Aktaş [2] su aktivni ugalj dobili iz prirodnih organskih materijala, kao što su ugalj i treset. Zbog svoje porozne strukture, velike specifične površine i termostabilnosti, Fu i Wang [5], su istakli da je aktivni ugalj vrlo efikasan u uklanjanju polutanata iz vazduha, za prečišćavanje iskorišćenih rastvarača i za prečišćavanje otpadnih voda. Međutim, visoka cena njegove proizvodnje, regeneracije i operativni troškovi primene na industrijskom nivou doveli su do potrebe za pronalaskom novih i jeftinijih adsorbenata. Aktivni ugalj se alternativno može proizvesti iz jeftinijih materijala dostupnih u velikim količinama u prirodi [6].

Novija istraživanja su pokazala da se mnogi drugi materijali mogu koristiti za pripremu aktivnog uglja, kao što su: slama kukuruza [7], kora krompira [8], šišarke bora [9], šećerna trska [10], kokosova ljuska [11], kora palme [12], ljuska semena bundeve [13], stare automobilske gume [14], te da bi se oni mogli uspešno primenjivati za uklanjanje jona teških metala.

Uprkos velikom broju objavljenih radova na sličnu temu i dalje se teži otkrivanju novih, jeftinijih i efikasnijih adsorbenata za prečišćavanje otpadnih voda. Iz tog razloga se mnogo pažnje poklanja ispitivanju različitih industrijskih i poljoprivrednih nusproizvoda (otpada), jer je za mnoge ustanovljeno da se mogu uspešno koristiti za uklanjanje različitih polutanata iz voda, od kojih će neki biti spomenuti u ovom radu. Fitoremedijacija je takođe jedna od obećavajućih metoda za jeftino i efikasno prečišćavanje otpadnih voda.

2. PRIRODNI RESURSI

Klasifikacija prirodnih resursa u Evropskoj Uniji, obuhvata podelu na iscrpljive i neiscrpljive, a u okviru svake od njih izdvajaju se obnovljivi i neobnovljivi. U neiscrpljive obnovljive resurse ubrajaju se: dispergovani resursi (solarni, vetar, talasi i padavine) i akumulirajući resursi (vazduh i okeani).



Sl. 1. Klasifikacija prirodnih resursa [1]

U iscrpljive obnovljive resurse spadaju: biološki resursi (šume, riblji fond i biomasa) i kumulirajući resursi (slatkovodni baseni i zemljište). Uobičajena generalna podela prirodnih resursa, kod nas i u svetu, jeste podela na iscrpljive i praktično neiscrpljive, a prema kriterijumu ljudskog merila vremena različitog trajanja je prikazana na slici 1 [1].

Rudarska industrija koja se bavi eksploatacijom i preradom mineralnih sirovina kao značajnog ekonomskog resursa, danas je na samom vrhu aktivnih zagađivača voda, zemljišta i vazduha. Eksploatacija mineralnih sirovina znači neposredno i posredno, delimično, trajno ili privremeno, uništavanje drugih prirodnih resursa, kao što su zemljište, vode i vazduh.

Zagađujuće materije u vodu mogu dospeti indirektno, spiranjem štetnih hemijskih supstanci iz zemljišta u podzemne vode, čijim kruženjem u prirodi ova zagađenja dospevaju u površinske vode ili direktnim ispuštanjem otpadnih voda u akvatičnu sredinu.

3. METODE ZA PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA

3.1. Adsorpcija

Prisutni polutanti se iz vode uklanjaju na različite načine. Jedna od tehnika za uklanjanje teških metala iz voda je adsorpcija, a posebnu pažnju privlači biosorpcija. Adsorpcija je tehnološka operacija koja na industrijskom nivou predstavlja proces uklanjanja jedne ili više komponenata iz tečne ili gasne faze pogodnom čvrstom fazom. Adsorbensi su materije koje imaju veliku specifičnu površinu, sposobnost vezivanja velike količine adsorbata, selektivni su, postoje na visokim temperaturama i imaju sposobnost lake desorpcije. Adsorpcija je u početku vrlo brz proces, dok je površina adsorbensa slobodna i dostupna za veliki broj molekula ili jona adsorbata. Koncentracija adsorbata vremenom raste i površina adsorbenta je sve manje dostupna za preostale molekule. Postoje različite vrste adsorbenata koje se koriste za sorpciju teških metala. Adsorbensi se dele na polarne i nepolarne. Nepolarni adsorbent je aktivni ugalj, a polarni su silika gel, jonoizmenjivačke smole i zeoliti.

Za istraživače, najveći izazov je izbor odgovarajuće biomase iz tako velikog broja jeftinih biomaterijala, a dostupnost i cena su vrlo važni faktori odabira. Najčešće se ispituju mikrobna biomasa, otpad šumarstva i agroindustrijskih kompleksa, kao i različiti makromolekuli prirodnog porekla. Biomasa može poticati i iz industrijskih procesa (industrijski otpad) ili se može uzgajati namenski za ovu primenu.

3.2. Biosorbenti

Kao biosorbenti na kojima se radilo poslednjih godina, izdvajaju se: bakterije, gljive, alge, industrijski otpad, poljoprivredni otpad i otpad iz životne sredine. U tabeli 1, Park i sar., [15] je dao podelu biosorbenata prema vrstama i kategorijama.

Tabela 1. Vrste biomase koja se mogu primeniti kao biosorbenti

Kategorija biosorbenta	Vrsta biomase
Bakterije	Gram-pozitivne bakterije (<i>Bacillus</i> sp., <i>Corynebacterium</i> sp.), gram-negativne bakterije (<i>Escherichia</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp.), cijano-bakterije (<i>Anabaena</i> sp., <i>Synechocystis</i> sp.)
Gljive	Plesni (<i>Aspergillus</i> sp., <i>Rhizopus</i> sp.), pečurke (<i>Agaricus</i> sp., <i>Trichaptum</i> sp.), kvasci (<i>Saccharomyces</i> sp., <i>Candida</i> sp.)
Alge	Mikroalge (<i>Clorella</i> sp., <i>Chlamydomonas</i> sp.), makroalge (zelena morska alga (<i>Enteromorpha</i> sp., <i>Codium</i> sp.), smeđa morska alga (<i>Sargassum</i> sp., <i>Ecklonia</i> sp.) i crvena morska alga (<i>Gelidium</i> sp., <i>Porphyra</i> sp.)
Industrijski otpad	Fermentacijski otpad, ostatci hrane i pića, aktivni mulj, anaerobni mulj
Poljoprivredni otpad	Slama, kukuruzovina
Otpad iz životne sredine	Ostatci biljaka, piljevina, trave, kora stabla
Drugi	Celulozni materijali, materijal koji sadrži hitozan

Bakterije su grupa mikroorganizama koje se mogu koristiti kao biosorbenti. Veoma su brojne u sorpciji metala iz vode. Primenjuju se kao biosorbenti zbog svoje veličine. One su malih dimenzija, pa imaju relativno veliku površinu po jedinici mase u odnosu na druge biosorbente, imaju sposobnost da rastu pod kontrolisanim uslovima i prilagodljive su na različite uslove okoline, a prisutne su svuda [16]. U istraživačkim radovima, najčešće se pominju rodovi *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptomyces*, *Escherichia*, *Micrococcus*, itd. [16]. Kada su bakterije u pitanju, veliki broj ispitivanja njihovih adsorpcionih karakteristika se vrši tek nakon njihove imobilizacije. Često se ispituju mogućnosti modifikacije bakterijskih vrsta kao adsorbenata u cilju poboljšanja njihovog adsorpcionog kapaciteta za vezivanje jona metala, što se pokazalo uspešno.

Gljive kao vrsta biomase ima tu prednost što imaju veliki procenat materijala ćelijskog zida, koji ima odlične osobine vezivanja metala. Mogu se dobiti iz prehrambene i industrije antibiotika, a i ova metoda uklanjanja teških metala predstavlja „eco-friendly” tehnologiju zbog svoje ekonomičnosti, efikasnosti, minimizacije hemijskog ili biološkog mulja i mogućnosti regeneracije i izdvajanja metala sa biosorbenata.

Alge su zbog njihovog visokog kapaciteta sorpcije i dostupnosti, kao i zbog praktično neograničenih količina koje se mogu naći u morima i okeanima od velikog značaja za razvoj novih biosorbenata [16]. Alge u odnosu na druge mikroorganizme imaju male zahteve za nutrijentima, autotrofne su, stvaraju veliku količinu biomase, a za razliku od bakterija i gljiva, ne proizvode toksične materije [17], ako se izuzmu neke cijanobakterije, pa su iz tog razloga pogodnije kao biomasa.

3.3. Poljoprivredni i drugi otpad

Predmet velikog interesovanja postao je poljoprivredni i industrijski otpad zbog niske cene, dostupnosti u velikim količinama, pa samim tim i mogućnosti primene na industrijskom nivou. Još jedna od velikih prednosti ovih materijala je u tome što se oni kao otpad iz nekog procesa mogu iskoristiti za tretman otpadnih voda kao ekološki adsorbenti, što je vrlo povoljno sa stanovišta upravljanja otpadom i principima održivog razvoja. Kanyal i Bhatt [18] ispitali su adsorpciju jona bakra i olova ljuskama jajeta, korom banane i bundevom. Sva tri adsorbenta su pokazala dobru efikasnost na pH 7, a ravnoteža je uspostavljena već nakon 90 min. Kao sorbent je iskorišćen i pivski kvasac (*S. cerevisiae*) iz pivare, kompost od zelenog bilja iz postrojenja za recikliranje i mulj iz fabrike šećera. Svi ovi materijali pokazali su određeni kapacitet za adsorpciju teških metala.

Posebnu podgrupu čine različiti nusproizvodi i poljoprivredni i industrijski otpad lignocelulozne strukture, jer imaju značajan potencijal kao adsorbenti. Tu se podrazumevaju ostaci prerade drveta i materijali koji zaostaju nakon žetve gajenih kultura, a koji i pored nekih drugih primena zaostaju u velikim količinama na njivama ili se spaljuju. U našoj zemlji najveće količine ovih materijala čine kukuruzovina i oklasak kukuruza, slama žitarica i soje, stabljike i glave suncokreta, stabljike duvana i sl. S obzirom da se poljoprivredni otpad i drvena masa razlikuju po svom hemijskom sastavu i strukturi, očekuje se da će imati i različit adsorpcioni kapacitet. Ovi biosorbenti su neiscrpniji u prirodi, jeftiniji, ne spadaju u štetne materije, mogu biti selektivni za teške metale i lako se odlažu i spaljuju [15]. Takođe, ispitani su materijali iz ove grupe, kao što su: piljevina različitih vrsta drveta kora manga, ljuska lešnika i kikirikija, zrna kafe, kore drveća, modifikovani celulozni materijali, hemijski modifikovani pamuk, otpaci šećerne repe i mnogi drugi.

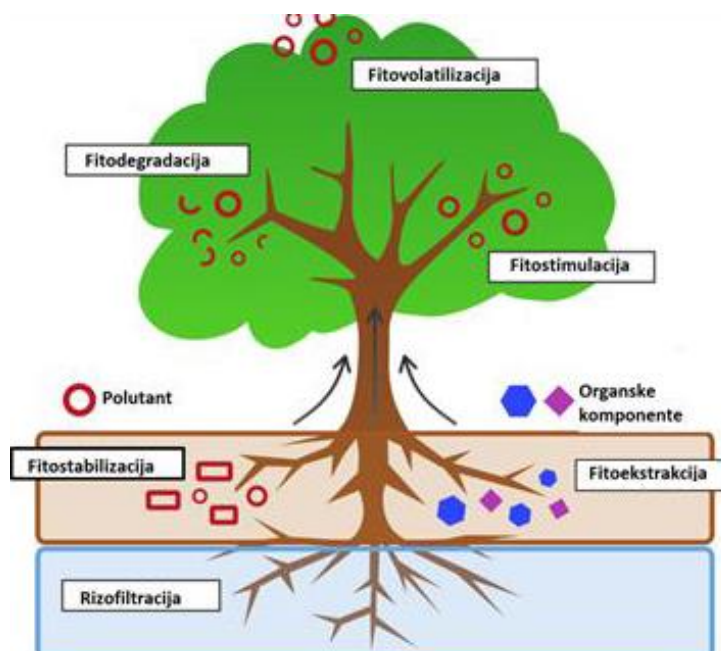
Tabela 2. Pregled adsorpcionih kapaciteta nekih lignoceluloznih materijala

VRSTA BIOMASE	METAL	ADSORPCIONI KAPACITET(mg/g)	AUTOR
Iglice bora	As(V)	3,27	Salaman i sar.,2015
Piljevina	Cd(II)	26,7	Salaman i sar.,2015
Kora banane		5,71	Salaman i sar.,2015
Pšenične mekinje	Cr(VI)	311	Salaman i sar.,2015
Pirinčane mekinje		58,9	Salaman i sar.,2015
Ljuska pirinča		52,1	Salaman i sar.,2015
Pirinčana slama		3,15	Salaman i sar.,2015
Šećerna trska		13,4	Miretzky i Cirelli, 2010
Lignin iz industrije papira	Ni(II)	13,5	Miretzky i Cirelli, 2010
Ljuska pirinča		10,9	Bilal i sar., 2013
Ljuska lešnika		0,064	Bilal i sar., 2013
Kora narandže		86,7	Bilal i sar., 2013
Kora banane		5,13	Salaman i sar.,2015
Piljevina	Zn(II)	14,1	Salaman i sar.,2015
Izluženi rezanci šećerne repe		17,8	Salaman i sar.,2015
Šećerna trska	Hg(I)	35,7	Salaman i sar.,2015
Kora eukaliptusa	Hg(II)	34,6	Salaman i sar.,2015

Radi sticanja uvida u biosorpcione karakteristike lignoceluloznih materijala, u tabeli 2 je dat kratak pregled nekih ispitivanih adsorbenata iz ove grupe.

4. FITOREMEDIJACIJA

Bioremedijacija predstavlja skup postupaka za remedijaciju uz primenu bioloških agenasa. U užem smislu, bioremedijacija podrazumeva remedijaciju uz pomoć mikroorganizama, a može se sastojati u mikrobiološkoj degradaciji i detoksikaciji zemljišta, površinskih i podzemnih voda, vazduha, čvrstog, tečnog i gasovitog otpada od štetnih supstanci ili zagađivača kao što su organske supstance (nafta, naftni derivati, pesticidi, deterdženti, polimeri, fenoli, organski rastvarači), veštačka đubriva, teški metali i drugi toksični elementi, radionuklidi ili otrovni gasovi. U širem smislu, bioremedijacija obuhvata remedijaciju uz pomoć biljaka, odnosno fitoremedijaciju. Fitoremedijacija, kao grana šire, bioremedijacione tehnologije, predstavlja relativno mladu i novu, tek razvijajuću i isplativu tehnologiju, nasuprot visoko-energetskim i skupim konvencionalnim tehnologijama.

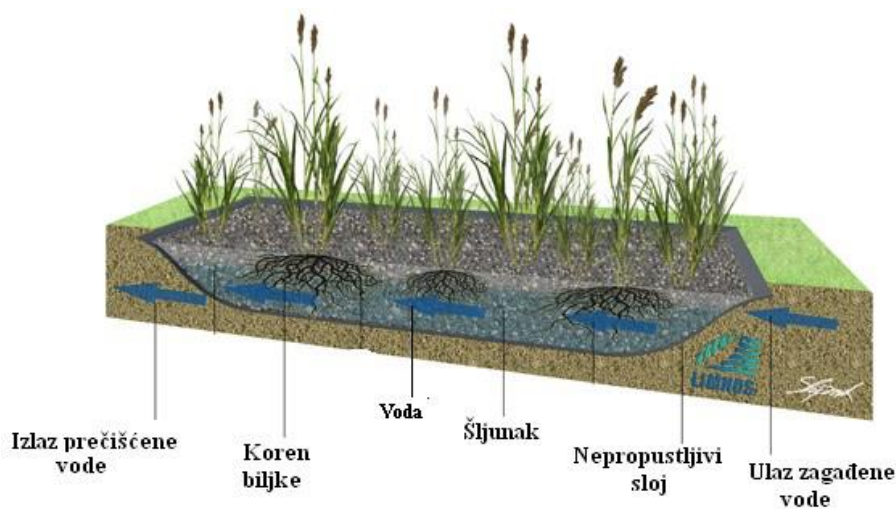


Sl. 2. Tipovi fitoremedijacije

Prema mehanizmima uklanjanja kontaminacije, zavisno od prirode polutanta, fitoremedijacija se može klasifikovati na nekoliko tipova, slika 2. Fitoekstrakcija, fitostabilizacija, rizofiltracija i fitovolatilizacija, relevantna su za uklanjanje teških metala, čak i onih najzahtevnijih poput olova i žive.

Fitoekstrakcija je prvi primenjivani oblik fitoremedijacije u kojem se biljke koriste da apsorbuju, koncentruju i talože teške metale iz podloge u svoje nadzemne delove (stablo, listove). Otkriće posebnog ekofiziološkog tipa biljaka – hiperakumulatora, pokazuje prirodni potencijal biljaka za sanaciju podloge od štetnih polutanata, s obzirom na njihovu ključnu različitost od ostalih vrsta; u svom telu mogu akumulirati 100 i više puta više metala. Dok veliki broj vrsta pokazuje veliku sposobnost akumulacije nikla, a potom i kadmijuma, kobalta i bakra, akumulacija metala poput olova i žive, daleko je manje zastupljena, pa se za pravim hiperakumulatorima ovih hazarda intenzivno traga. Iako je karakteristika hiperakumulatora sporiji rast, slabiji korenov sistem i mala produkcija biomase, a sama uspešnost zavisi od brojnih faktora (biodostupnosti metala u rizosferi, stope apsorpcije od strane korena, stope fiksacije u korenu, stope translokacije u stablo i listove kroz ksilem i stope tolerancije ćelija nadzemnih delova na metal) primena ovog oblika fitoremedijacije i dalje je ekološki i ekonomski najoptimalniji vid sanacije životne sredine.

Tip fitoremedijacije kao što su fitodegradacija i fitostimulacija, podrazumevaju biodegradaciju opasnih polutanata akumuliranih u nadzemne delove ili biodegradaciju pomoću brojnih metabolita izlučenih iz korena, pod dejstvom kojih polutant gubi svoju nativnu, štetnu formu, i prelazi u manje toksičan ili netoksičan oblik.



Sl. 3. Presek pojedinačne ćelije konstruisane močvare sa slobodnom vodenom površinom [22]

Svaki veštački močvarni sistem se zato uobičajeno pravi tako da se sastoji iz bazena (korita, ćelije) na čije dno se postavlja nepropusna folija (PVC), medijuma (od peska, šljunka, preko usitnjenog kamenja, prirodnih glina, do kompostirane organske materije), vode koja se tretira i zajednice odgovarajućih biljaka (slika 3). Bazeni mogu biti povezani i u nizove, tj. serije [23].

Metoda nije primenjiva u sanaciji područja kontaminiranih teškim metalima, iako može biti od pomoći drugim vidovima fitoremedijacije s aspekta promene biodostupnosti metala iz složenijih jedinjenja čiji su oni deo, pa svoju najčešću primenu nalazi kod remedijacije podloga kontaminiranih organskim jedinjenjima.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljene su i opisane tehnike biosorbcije i fitoremedijacije za uklanjanje teških metala iz otpadnih voda. Adsorpcija predstavlja jednu od pogodnijih metoda za uklanjanje zagađivača iz otpadnih voda zbog svoje isplativosti, jednostavnosti, visokog kapaciteta uklanjanja polutanata, kako or-

ganskog tako i neorganskog porekla, koji zagađuju vodu. Proces adsorpcije, odnosno biosorpcija na prirodnim adsorbensima, biosorbentima, je relativno noviji proces koji je našao veliku primenu u uklanjanju teških metala iz otpadnih voda.

Biosorbenti, pogotovu poljoprivredni i industrijski otpad (lignocelulozni materijali) su i dalje predmet ispitivanja pre svega zbog svoje dobre efikasnosti adsorpcije, dostupnosti u velikim količinama, pristupačnih cena i mogućnosti primene na industrijskom nivou. Prednost ovih materijala je u tome što se mogu regenerisati. Još jedna od velikih prednosti ovih materijala je u tome što se oni kao otpad iz nekog procesa mogu iskoristiti za tretman otpadnih voda kao ekološki adsorbenti, što je vrlo povoljno sa stanovišta upravljanja otpadom i principima održivog razvoja.

ZAHVALNOST

Autori su zahvalni na finansijskoj podršci Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za projekat TR34029 pod nazivom: „Razvoj tehnologije proizvodnje Pd katalizatora-hvatača za smanjenje gubitaka platine u visoko temperaturnim procesima katalize“ i projekat TR34004 pod nazivom: „Razvoj ekoloških i energetski efikasnijih tehnologija za proizvodnju obojenih i plemenitih metala kombinacijom bioluženja, solventne ekstrakcije i elektrolitičke rafinacije“.

LITERATURA

- [1] M. Milanović, D. Cvijanović, G. Cvijanović, Prirodni resursi, ekonomija, ekologija upravljanje, Institut za ekonomiku poljoprivrede, Beograd, 2008, ISBN 978-86-82121-54-1.
- [2] F. Çeçen, Ö. Aktaş, Activated carbon for water and wastewater treatment, Integration of adsorption and biological treatment, Wiley –VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2012.
- [3] P.C. Nagajyoti, K.D. Lee, T.V.M. Sreekanth, Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review, Environmental Chemistry Letters, 8 (2010) 199-216.
- [4] J.C. Igwe, A.A. Abia, A bioseparation process for removing heavy metals from waste water using biosorbents, African Journal of Biotechnology, 5 (12) (2006) 1167-1179.
- [5] F. Fu, Q. Wang, Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review, Journal of Environmental Management, 92 (2011) 407-418.

- [6] D. Nabarlantz, J. de Celis, P. Bonelli, A.L. Cukierman, Batch and dynamic sorption of Ni(II) ions by activated carbon based on a native lignocellulosic precursor, *Journal of Environmental Management* 97 (2012) 109-115.
- [7] X. Chen, G. Chen, L. Chen, Y. Chen, J. Lehmann, M.B. McBride, A.G. Hay, Adsorption of copper and zinc by biochars produced from pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution, *Bioresource Technology*, 102 (2011) 8877-8884.
- [8] J.C. Moreno-Pirajána, L. Giraldo, Activated carbon obtained by pyrolysis of potato peel for the removal of heavy metal copper (II) from aqueous solutions, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 90 (2011) 42-47.
- [9] M. Momčilović, M. Purenović, A. Bojić, A. Zarubica, M. Randelović, Removal of lead (II) ions from aqueous solutions by adsorption onto pine cone activated carbon, *Desalination* 276 (2011) 53-59.
- [10] K.K. Anoop, K.G. Sreejalekshmi, R.S. Baiju, Nickel (II) adsorption onto biomass based activated carbon obtained from sugarcane bagasse pith, *Bioresource Technology*, 102 (2011) 10239-10247.
- [11] E. Bernard, A. Jimoh, J.O. Odigure, Heavy metals removal from industrial wastewater by activated carbon prepared from coconut shell, *Research Journal of Chemical Sciences*, 3 (8) (2013) 3-9.
- [12] Y.B. Onundi, A.A. Mamun, M.F. Al Khatib, Y.M. Ahmed, Adsorption of copper, nickel and lead ions from synthetic semiconductor industrial wastewater by palm shell activated carbon, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 7 (4) (2010) 751-758.
- [13] A.I. Okoye, P.M. Ejikeme, O.D. Onukwuli, Lead removal from wastewater using fluted pumpkin seed shell activated carbon: Adsorption modeling and kinetics, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 7 (4) (2010) 793-800.
- [14] V.K. Gupta, I. Ali, T.A. Saleh, M.N. Siddiqui, S. Agarwal, Chromium removal from water by activated carbon developed from waste rubber tires, *Environmental Science and Pollution Research*, 20 (2013) 1261-1268.
- [15] D. Park, Y. Yun, J.M. Park, The past, present, and future trends of biosorption, *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 15 (2010) 86-102.
- [16] J. Wang, C. Chen, C., Biosorbents for heavy metals removal and their future, *Biotechnology Advances*, 27 (2) (2009) 195-226.
- [17] N. Das, D. Das, Recovery of rare earth metals through biosorption: An overview, *Journal of Rare Earths*, 31 (10) (2013) 933-943.

-
- [18] M. Kanyal, A.A. Bhatt, Removal of heavy metals from water (Cu and Pb) using household waste as an adsorbent, *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 6 (2015) 1-6.
 - [19] M. Salman, M. Athar, U. Farooq, Biosorption of heavy metals from aqueous solutions using indigenous and modified lignocellulosic materials, *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 14 (2) (2015) 211-228.
 - [20] P. Miretzky, A. Fernández Cirelli, Cr (VI) and Cr (III) removal from aqueous solution by raw and modified lignocellulosic materials: A Review, *Journal of Hazardous Materials*, 180 (1-3) (2010) 1-19.
 - [21] M. Bilal, J.A. Shah, T. Ashfaq, S.M. Hussain Gardazi, A.A. Tahir, A. Pervez, H. Haroon, Q. Mahmood, Waste biomass adsorbents for copper removal from industrial wastewater - A review, *Journal of Hazardous Materials*, 263 (2) 322-333.
 - [22] <http://www.limnos.si/en/services/constructed-wetland/>
 - [23] S. Alagić, M. Dimitrijević, Uklanjanje policikličnih aromatičnih ugljovodonika u konstruisanim močvarama, *Zaštita materijala*, 55 (1) (2014) 59-69.

UDK: 66.061:579.6:661.85(045)=163.41

ORIGINALAN STRUČNI RAD

Oblast: Biohidrometalurgija

**DOBIJANJE OLOVA IZ BIOLUŽNOG OSTATKA
POLIMETALIČNE SIROVINE**

**OBTAINING OF LEAD FROM THE BIOLEACHING RESIDUE OF
POLYMETALIC RAW MATERIAL**

Dragan Milanović, Suzana Dragulović, Vesna Conić,
Dragana Božić, Danijela Simonović

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Zeleni Bulevar 35, 19210 Bor, Srbija

E-mail: suzana.dragulovic@irmbor.co.rs

Izvod

Pri luženju sulfidne polimetalne sirovine dobija se, pored biolužnog rastvora, i biolužni ostatak, koji sadrži plemenite metale (Au i Ag) i olovo-sulfat. Tako, u toku procesa hemijskog i bioluženja, dolazi do vidljivih promena. To je karakteristično za svaki polazni materijal. Pre daljeg tretmana neophodna je karakterizacija lužnog ostatka (mineraloška, fizička, hemijska).

Zaostali čvrsti ostatak se tretira radi dobijanja olova, srebra i zlata. U radu je prikazana mogućnost dobijanja olova iz lužnog ostatka.

Lužni ostatak je prvo tretiran rastvorom natrijum-hlorida, pri čemu je dobijen rastvor olova (NaPbCl_3). Iz hloridnog rastvora, olovo je istaloženo u obliku olovo-karbonata, zatim je izvršeno redukciono topljenje i izlivena olovna anoda. Elektrolitičkom rafinacijom anodnog olova, korišćenjem rastvora olovo-karbonata u MSA, kao elektrolit, dobijeno je katodno olovo.

Treba naglasiti da se rastvor natrijum-hlorida, nakon taloženja i odvajanja olovo-karbonata, koriguje i ponovo vraća u naredni ciklus luženja biolužnog ostatka.

Ključne reči: Ruda tipa „sedex“, kompleksna struktura, lužni ostatak, elektrolitička rafinacija

Abstract

As a product of leaching of the sulphide polymetallic raw material, a leaching of residue is obtained, in which, besides precious metals Ag and Au, Pb is also contained.

Then, during the process of chemical and biological leaching, changes occur. That is, the characteristics of the starting mineral material has been changed. It is necessary to determine the characterization of this leaching residue (mineralogical, physical, chemical), before further treatment.

Solid residue further treatment for Pb, Ag and Au recovery, demonstrated the possible treatment of this leaching residue to obtain Pb.

The residue is first treated with a saturated sodium chloride solution, whereupon a chloride solution of lead (NaPbCl_3) is obtained. From the chloride solution, the lead was deposited in the form of lead-carbonate, followed by reduction melting, whereupon anode lead was obtained. Electrolytic refining of anode lead, using a solution of PbCO_3 in MSA as an electrolyte, gave the cathode lead.

It should be noted, that the sodium chloride solution, after precipitation and separation of

lead-carbonate, is corrected and returned to the new lead-sulfate leaching cycle from the bioleaching residue.

Keywords: *Sedex Ore, Complex Structure, Leaching Residue, Electrolytic refining*

1. UVOD

U Institutu za rudarstvo i metalurgiju u Boru vršena su eksperimentalna laboratorijska ispitivanja bioluženja polimetalične sirovine tipa „SEDEX“, koja je sadržala preko 10% svih korisnih obojenih i plemenitih metala [1]. Polimetalična sirovina, pored bakra, cinka i gvožđa, koji se izlužuju biološkim tretmanom, sadržala je i druge korisne komponente, koje ostaju u čvrstom biolužnom ostatku (to su olovo, zlato i srebro).

U radu je opisan tehnološki postupak tretiranja biolužnog ostatka od procesa luženja olovo-sulfata do dobijanja finalnog proizvoda - katodnog olova.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

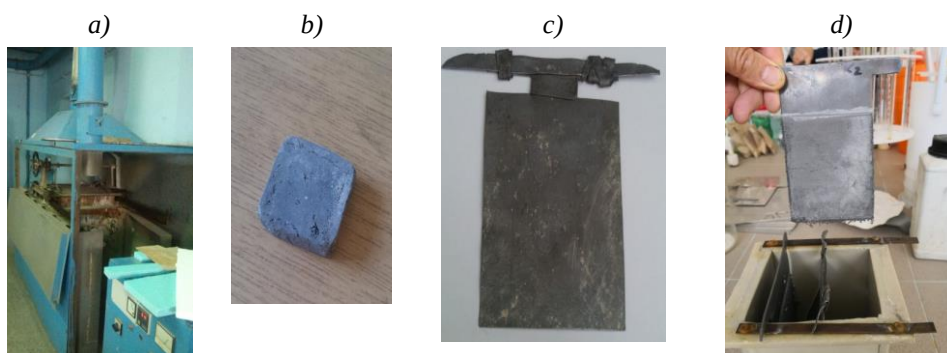
Biolužni ostatak je prerađivan u dve faze: 1 - Hloridno luženje olovo-sulfata i 2 - Tiosulfatno luženje zlata i srebra iz čvrstog ostatka.

Hloridnim luženjem biolužnog ostatka dobijen je rastvor natrijum-olovo-hlorida (NaPbCl_3), slika 1. Nakon filtriranja, iz dobijenog rastvora natrijum-olovo-hlorida istaložen je olovo-karbonat zasićenim rastvorom natrijum-karbonata, dok su u čvrstom ostatku ostali zlato i srebro (čvrsti ostatak je dalje tretiran u drugoj fazi procesa prerade biolužnog ostatka).

Nakon odvajanja taloga olovo-karbonata, korigovana je pH-vrednost filtra i isti je vraćen u sledeći ciklus luženja olovo-sulfata iz nove količine biolužnog ostatka. Talog olovo-karbonata je istopljen, uz dodatak topitelja i reducenata, pri čemu je dobijeno elementarno olovo, koje je izliveno u anode. Naime, prilikom hloridnog luženja olovo-sulfata, izlužuju se i male količine zaostalih metala od bioluženja (Cu, Zn, Fe, ...) koje prilikom taloženja i topljenja olovo-karbonata delimično ostaju u olovu. Da bi se dobilo čisto olovo, iz izlivenih olovni anoda, procesom elektrolitičke rafinacije dobijeno je katodno olovo komercijalnog kvaliteta. Elektrolitička rafinacija olovni anoda je vršena iz rastvora metan-sulfonske kiseline - MSA (rastvor olovo-karbonata u metan-sulfonskoj kiselini je korišćen kao elektrolit), slika2. [2,3]



Sl. 1. *Hloridno luženje olovo-sulfata*



Sl. 2. *Topljenje $PbCO_3$ i rafinacija olova:*
a) topljenje, b) livenje, c) Pb anoda, d) Pb katoda

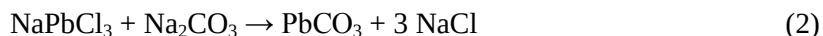
3. REZULTATI I DISKUSIJA

Olovo, u čvrstom biolužnom ostatku, je u obliku olovo-sulfata (u rudi je u obliku olovo-sulfida, ali tokom procesa bioluženja prelazi u olovo-sulfat).

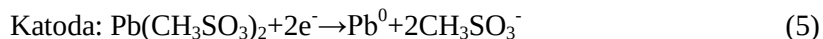
Hloridnim luženjem biolužnog ostatka dobija se rastvor natrijum-olovo-hlorida [4], prema sledećoj reakciji:



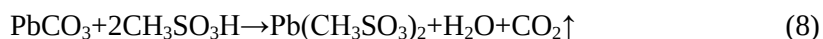
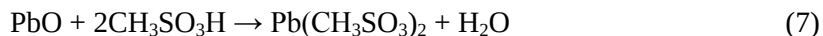
Olovo iz rastvora natrijum-olovo-hlorida (NaPbCl_3) moguće je valorizovati kroz više proizvoda: olovo-karbonat, olovo-oksidi [5] ili katodno olovo, prema sledećim reakcijama:



Katodno olovo se dobija elektrolizom sirovog olova (koje se dobija redukcijom topljenjem olovo-oksida), prema sledećim reakcijama [2]:



Elektrolit za elektrolitičku rafinaciju olova se dobija rastvaranjem olovo-oksida ili olovo-karbonata u metan-sulfonskoj kiselini, prema sledećim reakcijama [2]:



Na slici 3 prikazana je tehnološka šema procesa prerade biolužnog ostatka u cilju dobijanja olova komercijalnog kvaliteta.

Uslovi izvođenja eksperimenata su:

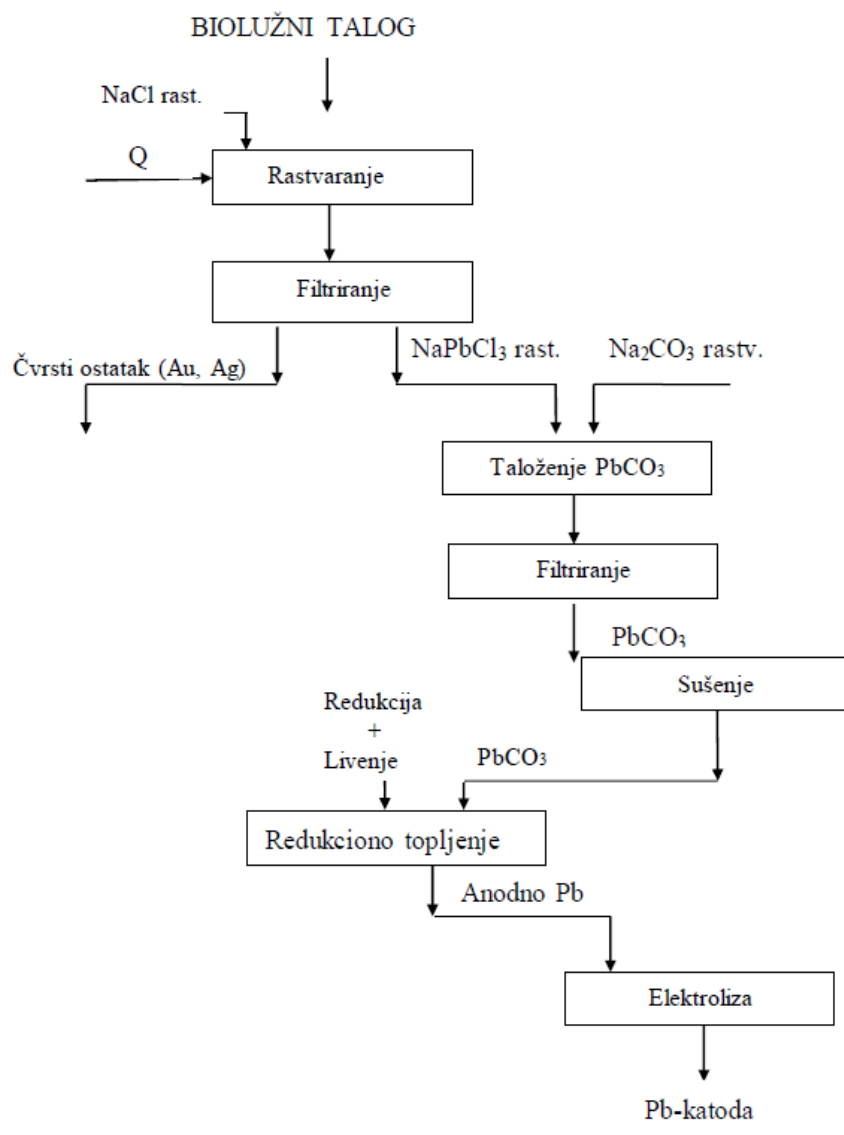
1. Luženje olovo-sulfata:

- Odnos Č : T = 1 : 20
- Koncentracija NaCl: 250 g/l
- Temperatura: 80 °C
- Vreme trajanja luženja: 20 minuta

2. Elektrolitička rafinacija olova

- Sastav elektrolita:

MSA	100 g/l
Pb	100 g/l
Organski aditiv (polietilenglikol)	0,25 g/l
T	20-30 °C
Dk	1,5 - 3,0 A/dm ²



Sl. 3. Tehnološka šema prerade biolužnog ostatka

4. ZAKLJUČAK

Luženjem biolužnog ostatka valorizuje se i olovo (pored bakra i cinka) iz polimetalične rude, pri čemu se postiže stepen izluženja olova min 90%.

Hloridni rastvor, nakon taloženja i izdvajanja olovo-karbonata, se koriguje i vraća na luženje nove količine olovo-sulfata iz biolužnog taloga.

Elektrolitičkom rafinacijom olovni anoda (dobijenih topljenjem olovo-karbonata) dobija se olovo komercijalnog kvaliteta (min 99,95%).

ZAHVALNOST

Rad je nastao kao rezultat 2 projekta:

1. *HORIZON 2020, IntMet, "Integrated innovative metallurgical system to benefit efficiency polymetallic, complex and low grade ores and concentrates". Contract No. MNPTR689515.*
2. *Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije br. TR34004 pod nazivom: „Razvoj ekoloških i energetski efikasnijih tehnologija za proizvodnju obojenih i plemenitih metala kombinacijom bioluženja, solventne ekstrakcije i elektrolitičke rafinacije“.*

LITERATURA

- [1] V. Conić, M. Rajčić Vujasinović, V. Trujić, V. Cvetkovski, Copper, zinc, and iron bioleaching from a polymetallic sulphide concentrate, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 24 (2014) 3688–3695.
- [2] Manfred Jordan, Modern Electroplating, Electrodeposition of lead and lead alloys, Fifth Edition, 2010, John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Patent US 2014/0131219 A1, Recovering lead from a mixed oxidized material, www.google.com/bz/patents/US20140131219?cl=en
- [4] V. Conić, B. Pesovski, V. Cvetkovski, Z. Stanojević-Šimšić, S. Dragulović, D. Simonović, S. Dimitrijević, Određivanje optimalnih uslova luženja olovo-sulfata rastvorom natrijum-hlorida, Hemijska industrija, 67 (3) (2013) 485-494.
- [5] S. Dragulović, D. Simonović, B. Anđelić, N. Petrović, B. Pešovski, V. Conić, Mogućnost proizvodnje olovo II oksida za potrebe kupelacije iz olovo sulfata dobijenog bioluženjem polimetaličnih sulfidnih koncentrata, Bakar, 38 (1) (2013) 11-16.

UDK: 621.51/.57(045)=163.41

ORIGINALAN STRUČNI RAD

Oblast: Mašinstvo

**PRORAČUN I PRINCIP RADA RASHLADNOG SUŠAČA VAZDUHA
CALCULATION AND WORK PRINCIPLES OF THE AIR
REFRIGERATION DRYER**

Branislav Rajković, Zoran Ilić, Daniela Urošević

Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, e-mail: branslav.rajkovic@irmbor.co.rs

Izvod

U ovom radu je opisan princip rada rashladnog sušača vazduha instalisanog u novoprojektovanoj kompresorskoj stanici za tehnološki i instrumentalni vazduh za potrebe rada filter presa u pogonu Filtraže rudnika „Lece“. Tehničke karakteristike komponenti kompresorske stanice date su tabelarno, a dispozicija opreme u kompresorskoj stanici data je grafički. Takođe, dat je proračun rashladnog sušača kao elementa kompresorske stanice.

Ključne reči: kompresorska stanica, princip rada, rashladni sušač

Abstract

This paper describes the principal of operation of the refrigeration dryer installed in a newly designed compressor station for technological and instrumental air for the needs of filter presses operation in Filtration facility of mine “Lece”. Technical characteristics of the components of the compressor station are given in tables, and the layout of the equipment in the compressor station is given graphically. It was also given the calculation of the refrigeration dryer as an element of the compressor station.

Keywords: compressor station, principal of operation, refrigeration dryer

1. UVOD

Na zahtev investitora u rudniku „Lece“ je 2012. godine započeta rekonstrukcija pogona Flotacije u svrhu povećanja kapaciteta prerade rude olova i cinka sa 230.000 t/god na 300.000 t/god [1]. U postojećem pogonu filtraže radila su dva vakuum filtera umesto kojih je projektom rekonstrukcije bila predviđena ugradnja dve filter prese (oznake PFKM-1000-5011). Za potrebe snabdevanja komprimovanim vazduhom filter presa, kao i dveju membranskih pneumatskih pumpi za transport pulpe od zgušnjivača do filter presa (oznake Boxer 502), predviđena je kompresorska stanica koja je smeštena u prizemlju objekta Filtraže [2]. U kompresorskoj stanici je predviđena oprema za proizvodnju i pripremu tehnološkog vazduha. Tehnološki vazduh iz kompresorske stanice, prethodno pripremljen u odgovarajućim pripremnim

grupama ispred potrošača, predviđen je za korišćenje i kao instrumentalni vazduh za rad automatskih sistema filter presa i membranskih pneumatskih pumpi.

2. TEHNIČKI OPIS

Za proizvodnju komprimovanog vazduha za pogon Filtraže rudnika „Lece“ u kompresorskoj stanici je predviđena sledeća oprema:

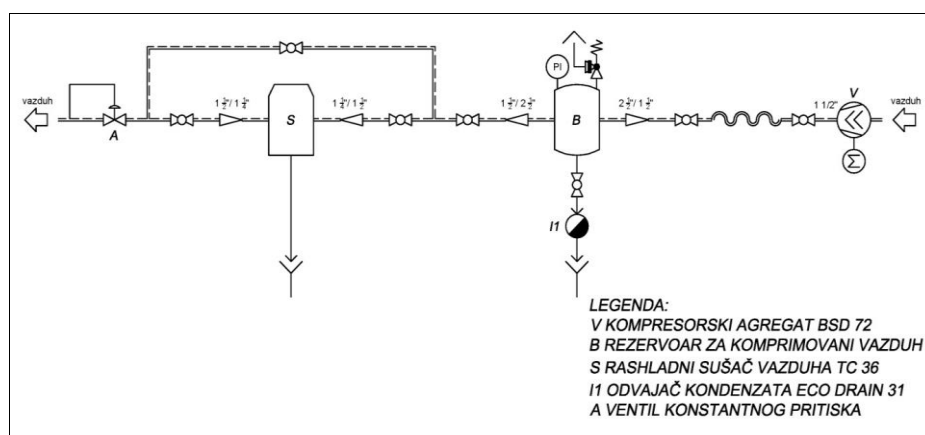
1. Vijčani kompresor KAESER BSD 72, kom. 1
2. Rashladni sušač vazduha KAESER TC 36, kom. 1
3. Rezervoar za vazduh 3 m³, kom. 1

Projektom rekonstrukcije je predviđeno da se u okviru kompresorske stanice ugradi kompresorski agregat sa stabilnim vijčanim vazduhom hlađenim uljno podmazivanim kompresorom sa tehničkim karakteristikama datim u tabeli 1.

Tabela 1. Tehničke karakteristike kompresorskog agregata

Proizvođač	KAESER
Tip	BSD 72
Snaga	37 kW
Maksimalni radni pritisak	15 bar
Radni pritisak	13 bar
Kapacitet FAD (1 bar; 20°C)	4,4 m ³ /min
Nivo buke	68 db
Priključak za komprimovani vazduh	G 1 1/2"
Dimenzije (dužina x širina x visina)	1530 x 1005 x 1700 mm
Masa agregata	1015 kg

Izgled kompresora dat je na slici 2.



Sl. 1. Tehnološka šema kompresorske stanice pogona Filtraže rudnika „Lece“

Iza kompresora je predviđen vertikalni rezervoar za komprimovani vazduh sa svom potrebnom armaturom tj. sigurnosnim ventilom, manometrom, revizionim otvorom i priključcima za ulaz i izlaz vazduha kao i priključkom za ispuštanje kondenzata sa tehničkim karakteristikama datim u tabeli 2.

Tabela 2. Tehničke karakteristike rezervoara za vazduh

Proizvođač	KAESER
Tip	vertikalni
Zapremina	3000 l
Maksimalni dozvoljeni radni pritisak	16 bar
Visina	2845 mm
Prečnik	Ø 1250 mm
Priključci za komprimovani vazduh	G 2 ½"
Masa	850 kg

Za ispuštanje kondenzata iz rezervoara je predviđen automatski odvajač kondenzata ECO DRAIN 31 proizvođača KAESER.

Komprimovani vazduh se od rezervoara vodi do rashladnog sušača vazduha. Rashladni sušač vazduha omogućava sušenje vazduha do temperature tačke rose od 3°C i opremljen je sa priključcima za ulaz i izlaz komprimovanog vazduha i ispuštanje kondenzata sa tehničkim karakteristikama datim u tabeli 3.

Tabela 3. Tehničke karakteristike rashladnog sušača vazduha

Proizvođač	KAESER
Tip	TC 36
Kapacitet pri 7 bara radnog pritiska	3,9 m ³ /min
Maksimalni dozvoljeni radni pritisak	16 bar
Pad pritiska	0,16 bar
Efektivna snaga pri 100% kapaciteta	0,9 kW
Priključci za elektro mrežu	230 V; 50 Hz; 1 Ph
Priključci za komprimovani vazduh	G 1 1/4"
Priključak za odvod kondenzata	DN 10
Dimenzije (visina x dužina x širina)	774 x 660 x 1009 mm
Masa	170 kg

Rashladni sušač vazduha je opremljen svom potrebnom armaturom i instalacija je izvedena tako da je omogućeno bajpasiranje rashladnog sušača radi njegovog servisiranja na način kao što je prikazano na slici 2.

Izgled rezervoara i rashladnog sušača dat je na slici 3.

Za regulaciju pritiska vazduha na izlazu iz kompresorske stanice predviđen je ventil konstantnog pritiska-regulator pritiska.



Sl. 2. *Kompresor u kompresorskoj stanici pogona Filtraže rudnika „Lece“*



Sl. 3. *Rezervoar i rashladni sušač u kompresorskoj stanici pogona Filtraže rudnika „Lece“*

3. PRORAČUN RASHLADNOG SUŠAČA VAZDUHA

Proračun rashladnog sušača kompresorske stanice ima za cilj izbor rashladnog sušača odgovarajućih tehničkih karakteristika za zadate radne uslove i dat je prema referenci [3].

Izabrani rashladni sušač TC 36 ima kapacitet od $3,9 \text{ m}^3/\text{min}$ pri referentnim uslovima.

Prema podacima proizvođača referentni uslovi su dati prema ISO 7983, opcija A i odnose se na:

- radni pritisak na ulazu u rashladni sušač $p = 7[\text{bar}]$
- ambijentalnu temperaturu $T_a = 25[^\circ\text{C}]$
- temperaturu na ulazu u rashladni sušač $T_i = 35[^\circ\text{C}]$
- kompresionu tačke rose $PDP = 3[^\circ\text{C}]$

Maksimalni protok komprimovanog vazduha kroz rashladni sušač pri radnim uslovima je:

$$V_{\text{max.operational}} = V_{\text{Reference}} \cdot c_p \cdot c_{T_i} \cdot c_{T_a} = 4,485 [\text{m}^3/\text{min}]$$

gde su:

$V_{\text{Reference}} = 3,9 [\text{m}^3/\text{min}]$ - protok komprimovanog vazduha pri referentnim uslovima

$c_p = 1,15$ - koeficijent radnog pritiska na ulazu u rashladni sušač za $p = 12[\text{bar}]$

$c_{T_i} = 1,00$ - koeficijent temperature na ulazu u rashladni sušač za $T_i = 35[^\circ\text{C}]$

$c_{T_a} = 1,00$ - koeficijent ambijentalne temperature za $T_a = 25[^\circ\text{C}]$

Dakle, rashladni sušač TC 36 odgovara po kapacitetu pri zadatim radnim uslovima.

Granični radni uslovi pri kojima može da radi ovaj rashladni sušač, pri upotrebi rashladnog sredstva R 134 a, su prema podacima proizvođača, sledeći:

- radni pritisak na ulazu u rashladni sušač $p = 16[\text{bar}]$
- ambijentalna temperatura $T_a = 43[^\circ\text{C}]$
- temperatura na ulazu u rashladni sušač $T_i = 55[^\circ\text{C}]$

4. DISKUSIJA DOBIJENIH REZULTATA

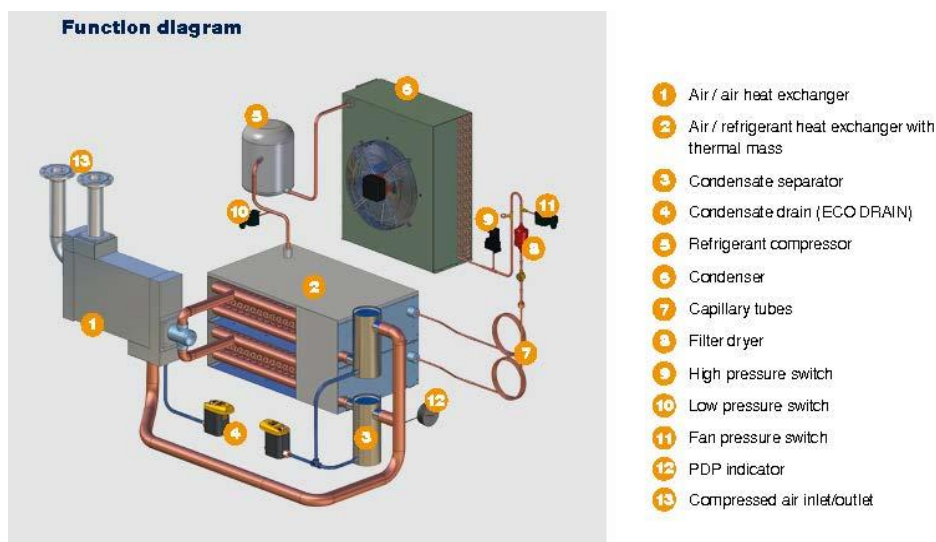
Prilikom projektovanja kompresorskih stanica koje se sastoje od kompresora, rezervoara za vazduh i rashladnog sušača, generalno postoje dve varijante smeštaja rashladnog sušača. Pri generalno konzistentnoj potrošnji vazduha rashladni sušač se locira iza rezervoara za vazduh kao što je ovde

slučaj. Prednosti ovakvog lociranja rashladnog sušača su prema referenci [4] sledeće:

- dimenzije sušača su odgovarajuće potrošnji komprimovanog vazduha,
- ravnomeran (neturbulentan) protok vazduha kroz sušač,
- niska temperatura komprimovanog vazduha na ulazu u sušač zbog hlađenja vazduha u rezervoaru, i
- mala količina kondenzata zbog izdvajanja dela kondenzata u rezervoaru.

U nedostatke lociranja rashladnog sušača iza rezervoara može se navesti da vremenom dolazi do korozije rezervoara zbog izdvajanja kondenzata, kao i da može doći do preopterećenja sušača pri iznenadnom značajnom povećanju potrošnje.

Maksimalno mogući protok kroz rashladni sušač se povećava pri porastu radnog pritiska. Nasuprot tome, maksimalni mogući protok kroz rashladni sušač se smanjuje pri porastu temperature ulaznog vazduha i ambijentalne temperature. Uticaj ovih parametara u odnosu na referentne uslove obuhvaćen je koeficijentima datim u proračunu. Sam princip rada rashladnog sušača sastoji se u fizičkom principu da vazduh na određenoj temperaturi može da primi ograničenu količinu vode u parnom stanju. Hlađenjem vazduha dolazi do kondenzacije dela vodene pare iz vazduha koja se odvodi kao kondenzat i na taj način se komprimovani vazduh suši. Princip rada instalacije rashladnog sušača dat je na slici 4.



Sl. 4. Instalacija rashladnog sušača vazduha

Komprimovani vlažan vazduh ulazi u rashladni sušač (poz. 13) i u prvom stepenu hlađenja se hladi u izmenjivaču toplote vazduh-vazduh (poz. 1) na račun zagrevanja osušenog vazduha koji se dovodi iz izmenjivača toplote vazduh-rashladni fluid (poz. 2). Osušeni vazduh posle zagrevanja u izmenjivaču toplote vazduh-vazduh (poz. 1) izlazi iz rashladnog sušača (poz. 13) kao izlazni osušeni vazduh. Iz izmenjivača toplote vazduh-vazduh (poz. 1) komprimovani vlažan vazduh se dovodi u izmenjivač toplote vazduh-rashladni fluid (poz. 2) gde se ostvaruje drugi stepen hlađenja. Na izlazu iz izmenjivača toplote vazduh-rashladni fluid (poz. 2) vazduh se dovodi u separator kondenzata (poz. 3) u kome se skuplja izdvojeni kondenzat nastao kao rezultat hlađenja vlažnog vazduha u drugom stepenu hlađenja i preko odvajača kondenzata-ECO DRAIN (poz. 4) kondenzat se odvodi iz rashladnog sušača. Preko odvajača kondenzata-ECO DRAIN (poz. 4) se takođe odvodi i kondenzat nastao usled hlađenja vlažnog vazduha u prvom stepenu hlađenja. Vlažnost osušenog vazduha na izlazu iz drugog stepena hlađenja meri se indikatorom kompresione tačke rose-PDP indikator (poz. 12). Hlađenje vazduha u drugom stepenu hlađenja ostvaruje se kao rezultat rada kompresorskog rashladnog uređaja odnosno na račun toplote isparavanja rashladnog sredstva u izmenjivaču toplote vazduh-rashladni fluid (poz. 2) koji predstavlja isparivač. Iz isparivača se rashladni fluid preko kompresora (poz. 5) dovodi u kondenzator (poz. 6). Dakle, u kompresoru (poz. 5) se rashladni fluid komprimuje od pritiska isparavanja na pritisak kondenzacije. U kondenzatoru (poz. 6) se rashladni fluid kondenzuje i preko kapilarne cevi (poz. 7) ekspandira i odvodi u isparivač (poz. 2) čime se rashladni ciklus zatvara. Toplota kondenzacije, oslobođena pri kondenzaciji rashladnog fluida, se odvodi vazduhom koji prinudno cirkuliše kroz kondenzator posredstvom ventilatora. Filter sušač (poz. 8) namenjen je za filtriranje i sušenje tečnog rashladnog fluida pre ulaska u isparivač (poz. 2). Prekidač visokog pritiska kompresora (poz. 9), prekidač niskog pritiska kompresora (poz. 10) i prekidač pritiska ventilatora (poz. 11) spadaju u uobičajenu opremu za automatsko upravljanje radom kompresorskih rashladnih uređaja.

5. ZAKLJUČAK

Izbor sušača vazduha u instalacijama komprimovanog vazduha uslovljen je tehnološkim zahtevima potrošača koji diktiraju potrebnu klasu kvaliteta komprimovanog vazduha po standardu ISO 8573-1. Proračun rashladnog sušača se svodi na proveru njegovog kapaciteta u datim radnim uslovima, kao što je prikazano u ovom radu. Rashladnim sušačem može se ostvariti kompresiona tačka rose do 2°C jer daljim snižavanjem temperature dolazi do zamrzavanja vode u sistemu. Za ostvarivanje nižeg sadržaja vlage u vazduhu najčešće se koriste adsorpcioni ili membranski sušači vazduha.

6. LITERATURA

- [1] B. Rajković, Z. Ilić, D. Urošević, Compressor station for Filtration Facility in mine „Lece“, The 47th International October Conference on Mining and Metallurgy, 04.-06. October 2015, Bor Lake, Bor, Serbia; pp. 465-468.
- [2] Tehnički mašinski projekat kompresorske stanice i razvoda komprimovanog vazduha za filter prese, Projektni biro MEGA, Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, 2013.
- [3] Katalozi proizvođača kompresora KAESER
- [4] M. Bogner, O. Popović, Kompresorska postrojenja, ETA Beograd, 2008, pp. 106-107.

UDK: 622.012:005(045)=163.41

ORIGINALAN NAUČNI RAD

Oblast: *Ekonomija i menadžment*

**INOVATIVNI PRISTUP EVALUACIJE ZADOVOLJSTVA KORISNIKA
U RUDARSKIM KOMPANIJAMA**

**INNOVATIVE APPROACH TO EVALUATION OF CUSTOMER
SATISFACTION IN MINING COMPANY**

Slavica Miletić¹, Dejan Bogdanović², Miroslav Ignjatović³

¹Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, Zeleni Bulevar 35, 19210 Bor,
Srbija, E-mail: slavica.miletic@irmbor.co.rs

²Tehnički fakultet u Boru, Univerzitet u Beogradu, V.J. 12, 19210 Bor,
Srbija, E-mail: dbogdanovic@tfbor.bg.ac.rs

³Privredna komora Srbije, Resavska 13-15, 11000 Beograd, Srbija
E-mail: miroslav.ignjatovic@pks.rs

Izvod

Ovaj rad ima za cilj da predstavi inovativni pristup evaluacije zadovoljstva korisnika proizvodima i uslugama u rudarskim kompanijama. Danas, rudarske moderne kompanije imaju za cilj da zadovolje svoje korisnike proizvodima i uslugama na inovativan način.

Predložena inovativna metodologija je AHP metoda koja služi za rangiranje atributa što zahtevaju ISO standardi: načina rešavanje žalbi korisnika, vreme realizacije zahteva korisnika, sposobnost radnog osoblja, kvaliteta i komunikacija sa korisnicima.

Izabrana metodologija služi da prikaže efikasnu evaluaciju zadovoljstva korisnika koja može snažno uticati na učinak biznisa, performansi i konkurenciju moderne rudarske kompanije.

Ključne reči: korisnik, proizvodi i usluge, AHP metoda, rudarske kompanije

Abstract

This paper aims to present an innovative approach to evaluating consumer satisfaction with products in services in mining companies. Today, modern mining companies aim to satisfy their customers' products and innovations in an innovative way.

The proposed methodology is an innovative AHP method that is used to rank the attributes they require ISO standards: the mode of solving customer complaints, during the implementation of customer requirements, the ability of the working staff, quality and communication with customers.

The chosen methodology is used to display the effective evaluation of customer satisfaction, which can strongly influence the performance of the business, performance and competitiveness of modern mining company

Keywords: user, products and services, AHP method, mining companies

1. UVOD

Moderne rudarske kompanije da bi bile uspešne u ekonomskoj sferi fokusiraju se na tehničku i inženjersku izvrsnost i rano usvajanje savremeno tehnološko poboljšanje. Njihova uspešnost u ekonomskoj sferi ne pruža dobro zaokruženu sliku ukupnog učinka, željene rezultate.

Tim menadžmenta rudarskih kompanija su ti koji planiraju da uspostave programe koji će poboljšati performanse kompanije za ključne poslovne procese. Menadžment rudarskih kompanija ima više ideja odakle da se počne sa analizom i koji su prioriteti za poboljšanje proizvoda i usluga.

Autori rada uz pomoć menadžerskog tima daju jednu od mogućih ideja da se uradi analiza očekivanja korisnika njihovim proizvodima i uslugama. Korisnici imaju određena očekivanja od rudarskih kompanija.

Inovativni pristup evaluacije zadovoljstva korisnika predstavlja vredan pokazatelj za trenutne i buduće performanse kompanije. Analiza zadovoljstva korisnika sa zaposlenima i vlasnicima čini veliku trojku za zainteresovane strane. Za rudarske kompanije ova analiza je najvažnija jer pokazuje koliko korisnici mogu snažno uticati na učinak biznisa.

Zahteve koje podržava ISO standard su atributi gde se vrši procena zadovoljstva korisnika i to: kvalitet, vreme realizacije zahteva korisnika, komunikacija korisnika, način rešavanja njihovih žalbi i sposobnost radnog osoblja.

Zadovoljstvo korisnika moderne rudarske kompanije je veoma važno i zavisi i od ostalih zainteresovanih strana. Npr. ako zaposleni nisu zadovoljni, oni neće pružiti nivo usluga koji su potrebni da bi zadovoljili korisnike [1].

Atributi koji imaju veći uticaj na poboljšanje zadovoljstva korisnika analizirani su primenom AHP metode (Analitički hijerarhijski proces, eng. Analytical Hierarchy Process-AHP).

2. TEORIJSKA OSNOVA

Finansijski rezultati koje su moderne rudarske kompanije postigle u nekom određenom vremenskom periodu ne daju potpunu sliku gde i kako se mogu poboljšati performanse. Tako da su potrebne i dodatne analize u modernim rudarskim kompanijama.

Savremeno poslovanje od menadžmenta rudarskih kompanija zahteva evaluaciju atributa koje ISO standardi (Međunarodna organizacija za standardizaciju) zahtevaju i to: kvaliteta, vreme realizacije zahteva korisnika, komunikacija sa korisnicima, način rešavanja žalbi korisnika i sposobnost radnog osoblja. Atributi (kriterijumi) za procenu zadovoljstva korisnika imaju veliki značaj za MCDM metode (Metode višekriterijumskog odlučivanja, eng. Multiple Criteria Decision Making – MCDM). Po autoru Stanujkiću [2], skup

kriterijuma bi trebalo da zadovolji sledeće zahteve: da bude kompletan, ne suvišan i da zadovoljava minimalnu vrednost.

Moderne rudarske kompanije žele da budu mnogo više finansijski uspešne, ali finansijski uspeh u nekom kratkom roku ne garantuje opstanak i održivost, tako da postoje i druge analize koje se mogu proceniti da bi pružile uravnoteženiju sliku zdravlja preduzeća [3]. Ovakva primenjena inovativna metodologija može se pratiti tokom vremena i može dati rane i procenljive znakove i probleme sa performansama u rudarskim kompanijama.

Relativna važnost atributa zadovoljstva korisnika, takođe, je važna za rudarske kompanije pri donošenju strateških odluka i njenu održivost. Svaki atribut od navedenih može imati jednu ili više funkcija koja će povećati zadovoljstvo korisnika. Određeni atributi mogu biti važniji za korisnike od drugih [4]. Merenje očekivanja korisnika kod rudarskih kompanija može se izvršiti anketom gde se dobijaju subjektivni rezultati, oni mere percepciju učinka protiv očekivanja. Tako se anketiranjem korisnika dobija ne zdrava slika o performansama kompanije. Pravilan izbor strukture atributa od donosioca odluka donosi daleko kvalitetnije odluke.

Izabrani atributi za procenu zadovoljstva korisnika na osnovi ISO standarda su:

Atribut (A1): Način rešavanja žalbi korisnika: Jedan od načina rešavanja žalbi korisnika je stalna komunikacija sa menadžmentom rudarske kompanije. Broj žalbi na 1000 korisnika treba da bude manji od 10%.

Atribut (A2): Vreme realizacije zahteva korisnika: korisnici modernih rudarskih kompanija su zadovoljni kad su njihovi zahtevi na vreme realizovani. Znači, moraju se izbeći sva zakašnjenja, definisati tačne aktivnosti za koje vreme i način se mogu realizovati da bi ispunili zahteve i očekivanje korisnika.

Atribut (A3): Sposobnost radnog osoblja: Zainteresovane strane su pojedinci ili grupe gde zaposleni pripadaju i koji mogu značajno uticati na učinak modernog poslovanja kod rudarskih kompanija. Sposobnost radnog osoblja i njihovo zadovoljstvo direktno utiče na zadovoljstvo korisnika tako da njihovi stavovi moraju biti jasno definisani.

Atribut (A4): Kvalitet: Strategija modernih rudarskih kompanija povećava važnost na osnovu kvaliteta proizvoda i usluga sa time se povećava, profit, konkurentnost i pozicionarnost [3]. Očekivanja korisnika su visoka sa kvalitetnim proizvodima i uslugama tako da se ovaj atribut kotira VISOKO značajnim.

Atribut (A5): Komunikacija sa korisnicima: Česte i stalne komunikacije sa korisnicima pružaju uravnoteženi učinak modernim rudarskim kompanijama. Potrebno je da menadžerski tim modernog rudarskog poslovanja zna šta korisnici očekuju od njih.

U radu primenom AHP metode vrši se procena stepena važnosti datih atributa koji su važni i za implementaciju Sistema Menadžmenta Kvalitetom (QMS).

U poslednjoj deceniji se sve češće koristi AHP metoda za rešavanje relanih problema u procesu odlučivanja u mnogim oblastima: rudarstva [5,6]; menadžmenta [7,8] sistema kvaliteta [9,10]; održivog razvoja [11,12]; itd.

3. MODEL ISTRAŽIVANJA

Procenu stepena važnosti atributa u rudarskim kompanijama urađena je primenom AHP metode koju je uveo Thomas Saaty, 1980 [13]. AHP metoda je efikasno sredstvo za rešavanje složenih problema obuhvatajući i subjektivni i objektivni aspekte odluka. Njena funkcija je da pruži pomoć donosiocu odluka, da odredi prioritet i najbolju odluku. Uključujući korisnu tehniku za proveru konzistentnosti procene donosioca odluke, čime se smanjuje pristrasnost u procesu donošenja odluka.

AHP razmatra set kriterijuma za evaluaciju i set alternativnih opcija među kojima treba izabrati najbolju odluku. Kriterijumi mogu biti suprostavljeni i od njih zavisi najbolja opcija.

AHP metoda generiše težinu za svaki kriterijum procene u skladu sa parnim poređenjem kriterijuma od strane donosioca odluka. Tako da, ako je težinski koeficijent nekog kriterijuma veći onda je on važniji kriterijum.

Proračuni koji su urađeni implementacijom AHP uvek su vođeni iskustvom donosioca odluka, tako da se AHP smatra kao sredstvo koje je u stanju da prevede ocene (i kvalitativne i kvantitativne) koje donese donosilac odluka u višekriterijumsko rangiranje.

AHP je jednostavna metoda jer nema potrebe da se gradi kompleksan ekspertni sistem sa znanjem donosioca odluka u njemu.

AHP metoda se može implementirati u tri koraka:

1. Izračunavanje vektora težine kriterijuma;
2. Izračunavanje matrice rezultata opcija; i
3. Rangiranje opcija.

Da bi izračunali težinske koeficijente za različite kriterijume, prvo kreiramo matricu upoređivanja u paru A. Matrica A je realna matrica $m \times m$, gde je m broj razmatranih kriterijuma koji se procenjuju.

Svaki unos a_{jk} matrice A predstavlja 1 značaj j-tog kriterijuma u odnosu na k-ti kriterijum.

Elementima koji se nalaze na dijagonali matrice dodeljuje se vrednost 1, odnosno

$$w_i/w_i = 1 \tag{1}$$

Ako je $a_{jk} > 1$, onda je j-ti kriterijum manje važan od k-tog kriterijuma.
Ako dva kriterijuma imaju istu važnost, onda je unos a_{jk} jednak 1.
Unosi a_{jk} i a_{kj} zadovoljavaju sledeće ograničenje:

$$a_{jk} \cdot a_{kj} = 1 \quad (2)$$

Očigledno da je $a_{jj} = 1$ za sve j. Relativna važnost između dva kriterijuma se meri prema brojačanoj skali od 1 do 9, Saatijeve skale, kao što je prikazano u Tabeli 1, gde se pretpostavlja da je j-ti kriterijum važniji od k-tog kriterijuma.

Tabela 1. Skala upoređenja kriterijuma

Vrednost a_{jk}	Tumačenje rezultata
1	j i k su jednako važni
3	j je nešto važniji od k
5	j je važniji od k
7	j je jako važniji od k
9	j je apsolutno važniji od k
2,4,6,8	su međuvrednosti

Jednom kada je matrica A izgrađena, moguće je iz A izvesti normalizovano uporedno poređenje matrice A_{norm} tako što je jednako 1 sumi unosa na svakoj koloni, tj svaki unosa $\bar{a}_{jk}$ matrice A_{norm} izračunata kao:

$$\bar{a}_{jk} = \frac{a_{jk}}{\sum_{i=1}^m a_{ik}} \quad (3)$$

Konačno, vektor kriterijuma w (koji je m-dimenzionalni vektor kolone) je izračunat usredinjavanjem unosa za svaki red A_{norm} , tj. kako je dato u Tabeli 2 koja prikazuje matricu upoređivanja atributa.

Tabela 2. Matrica upoređivanja atributa

Atributi	A_1 (način rešavanja žalbi korisnika kvaliteta)	A_2 (vreme realizacije zahteva korisnika)	A_3 (sposobnost radnog osoblja)	A_4 (kvalitet)	A_5 (komunikacija sa korisnicima)
A_1	1	1/3	1/3	1/5	1/2
A_2		1	1/2	1/2	3
A_3			1	1	5
A_4				1	5
A_5					1

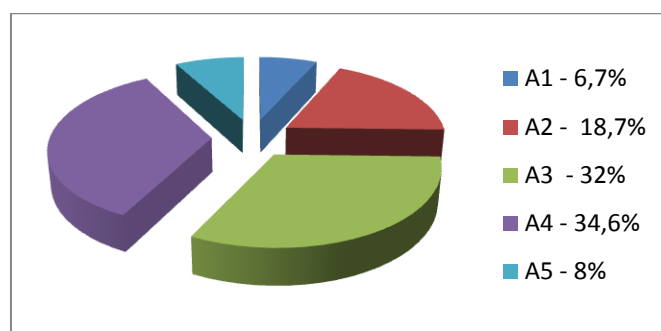
Proračun AHP metode je urađen softverom Criterium Decision Plus. Stepenn konzistentnosti proračunom AHP treba da bude manji od 1, kao što je u ovom proračunu. U slučaju da se ne dobija ta vrednost mora se ponoviti postupak upoređivanja kriterijuma (atributa).

Dobijeni rezultati dati su u Tabeli 3 i to po sledećem redosledu: Atribut A4 je na prvom mestu, na drugom mestu je atribut A3, na trećem mestu je atribut A2, na četvrtom mestu A5 i na petom mestu atribut A1.

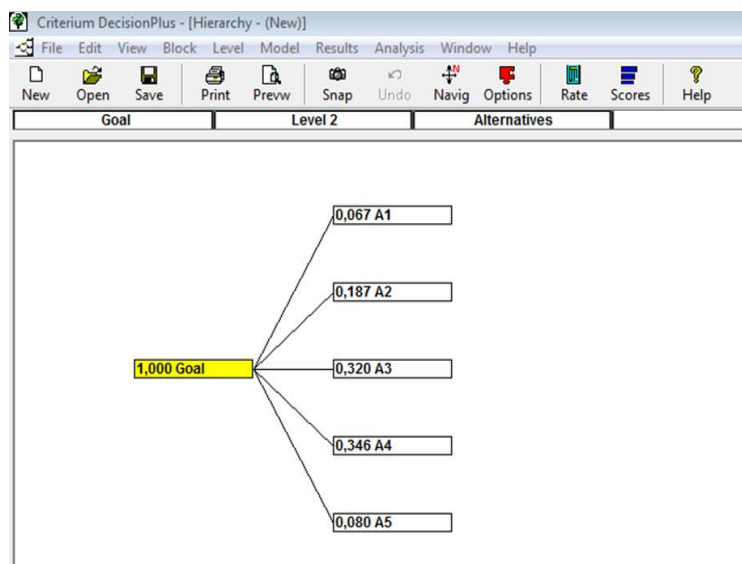
Tabela 3. Finalni rezultati

ATRIBUTI	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
Tež. kof. krit.	0,067	0,187	0,320	0,346	0,080
Koef. konzist. $0,030 < 0,1$					

Slika 1 Prikazuje raspodelu atributa po važnosti koja je data u procentima, a slika 2 hijerarhiju atributa zadovoljstva korisnika.



Sl. 1. Raspodela atributa po važnosti data u procentima



Sl. 2. Hijerarhija atributa zadovoljstva korisnika

4. ANALIZA REZULTATA I DISKUSIJA

Upoređivanje atributa implementacijom AHP metode, koji su prikazani u Tabela 3, mogu se proanalizirati na sledeći način:

- Atribut A4, kvalitet je na prvom mestu jer iznos njegovog težinskog koeficijenta je najveći i iznosi 0,346. ISO standard 9001:2015 je okvir za sprovođenje sistema menadžmenta kvalitetom koji se fokusira na organizacione performanse u pogledu kvaliteta proizvoda i usluga. Kvalitet je uslov za poboljšanje ukupnog učinka moderne rudarske kompanije. Kvalitetom moderne rudarske kompanije obezbeđuje se poverenje korisnika, osvajaju nova tržišta, izgrađuje svoj brend i postižu bolja pozicionirna mesta na globalnom tržištu, na kom se, pored visokog kvaliteta procesa, proizvoda i usluga, traže i dokazi za postojeći kvalitet.
- Na drugom mestu je atribut A3, sposobnost radnog osoblja. Njegov težinski koeficijent iznosi 0,320. Sposobno radno osoblje tj. zaposleni koji poseduju znanje i iskustvo utiču na zadovoljstvo korisnika i daju kvalitetne proizvode i usluge. U suprotnom, nesposobno radno osoblje kompaniju može da dovede do nelikvidnosti. Čak i nezadovoljstvo zaposlenih može negativno da utiče na zadovoljstvo korisnika.
- Na trećem mestu je atribut A2, vreme realizacije zahteva korisnika sa težinskim koeficijentom 0,187. Vreme realizacije zahteva korisnika mora da se ispoštuje i svi definisani zahtevi od strane korisnika. Savremene svetske kompanije imaju svoje menadžere koje upravljaju vremenom, upravljanje vremenom modernog menadžera (PROJECT MANAGEMENT). Upravljanje vremenom je sposobnost project menadžera da postavi i ostvari ciljeve i zahteve korisnika u određenom vremenskom periodu.
- Na četvrtom mestu je atribut A5, komunikacija sa korisnicima čiji je težinski koeficijent 0,080. U savremenom rudarskom poslovanju je od izuzetne važnosti komunicirati sa korisnicima na efikasan i efektivan način. Pripremiti zanimljivu poruku i preneti je na najbolji mogući način odabranim sredstvima za prenošenje tako da osigurate prenešenu poruku onako kako ste je zamislili o proizvodu. Savremene svetske kompanije poseduju osobe koje upravljaju komunikacijama. Korisnik je taj koji prvi započinje komunikaciju slanjem zahteva za potrebne proizvode i usluge.

-
- Na petom mestu je atribut A1, rešavanje žalbi korisnika. Menadžment moderne rudarske kompanije treba da identifikuje žalbe korisnika u što kraćem roku kroz jasnu i otvorenu komunikaciju i uz zajednički rad na rešavanju žalbi treba da reši problem i ostvari dugoročnu saradnju na obostranu korist. Ponekad je potrebno hitno rešiti određeni problem onda nazvati korisnika telefonskim putem i krenuti sa procedurom za rešavanjem problema. Kratko vreme rešavanja žalbi za korisnika znači i veće poverenje i zadovoljstvo.

5. ZAKLJUČAK

Od menadžmenta modernih rudarskih kompanija se traži inovativno ispitivanje zadovoljstva korisnika jer tradicionalne finansijske mere ne pružaju dobro izbalansiranu sliku, a nisu ni u mogućnosti da identifikuju gde je potrebno poboljšanje performansi kompanije.

Ovaj rad prikazuje inovativni pristup AHP metode za procenu zadovoljstva korisnika u modernim rudarskim kompanijama u cilju povećanja profita, opstanka i održivosti kompanije.

AHP metoda pruža uravnoteženi pristup definisanju i identifikaciji zadovoljstva korisnika, procenu ispunjenosti tih očekivanja i mogućnost objektivne slike o najvažnijem atributu zadovoljstva korisnika.

Inovativna metoda pokazuje da je najvažniji atribut za ocenu zadovoljstva korisnika proizvodima i uslugama A₄, kvalitet sa težinskim koeficijentom 0,346.

Primenjena metodologija nam omogućava efikasno i konstantno praćenje performansi moderne rudarske kompanije za razliku od trenutnih finansijskih rezultata i pruža mogućnost za uspeh same kompanije.

Implementirana metodologija može se primeniti u svim granama privrede gde postoje realni konfliktni problemi. Izbor implementacije MCDM metoda zavisi od donosioca odluke ili menadžera.

ZAHVALNICA

Istraživanja čiji se rezultati prezentuju u ovom radu su finansirana od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije kao deo projekta br: TR-33023 pod nazivom: „Razvoj tehnologije flotacijske koncentracije rude bakra i plemenitih metala radi postizanja boljih tehnoloških rezultata“ i TR 34023 pod nazivom: „Razvoj tehnoloških procesa prerade nestandardnih koncentrata bakra u cilju optimizacije emisije zagađujućih materija“.

LITERATURA

- [1] M.R. Curtice, Stakeholder Analysis: The Key to Balanced Performance Measures, Process Porfolio Management, BPTrends, 2006.
- [2] D. Stanujkic, N. Magdalinovic, D. Milanovic, S. Magdalinovic, G. Popovic, An efficient and simple multiple criteria model for a grinding circuit selection based on MOORA method, Informatica, 25(1), 2014, 73-93.
- [3] R. Kaplan, D. Norton, The Balanced Scorecard - Measures that Drive Performance, Harvard Business Review, January-February 1992.
- [4] N. Kano, N. Seraku, F. Takahashi, S. Tsuji, Attractive quality and must-be quality, In The best on quality, edited by John D. Hromi. Volume 7 of the Book, Series of the International Academy for Quality, Milwaukee: ASQC Quality Press, 1996.
- [5] S. Miletić, V. Conić, Multi-Criteria Prioritization of Restructuring Projects of Underground Coal Mines in Serbia, Innovation as an Initiator of the Development "Innovations – Basis for Development", International Thematic Monograph – Thematic Proceedings, University Business Academy in Novi Sad, Faculty of Applied Management, Economy and Finance, Belgrade, MEFkon 2018, December 6th Belgrade, 2018, 442-461.
- [6] D. Bogdanovic, S. Miletic, H. Dehghan, Multi-Criterion Analysis of the Most Important Aspects of the Environmental Pollution, Journal Mining and Metallurgy Engineering Bor, Vol. 24, No 3-4, 2018, 117-124.
- [7] S. Miletć, Z. Stanojević Šimšić, Strategic Analysis of Organization by AHP Method, Innovation as an Initiator of the Development "Innovations – Basis for Development", International Thematic Monograph – Thematic Proceedings, University Business Academy in Novi Sad, Faculty of Applied Management, Economy and Finance, Belgrade, MEFkon 2018, December 6th Belgrade, 2018, 289-307.
- [8] S. Miletić, D. Bogdanović, M. Ignjatović, Analiza zahteva zainteresovanih strana, Bakar, Vol. 44, Br. 2, 2018, 101-109.
- [9] S. Miletić, D. Bogdanovic, Dž. Paunković, Selection the Optimal Model of Integrated Sustainable Management System in the Mining Companies, Journal Mining and Metallurgy Engineering Bor, Vol. 2, 2015, 181-204.
- [10] S. Miletic, D. Bogdanovic, D. Mihajlović, V. Krstić, Analiza poslovnih rizika u rudarskim kompanijama, Bakar, Vol. 43, Br. 1, 2018, 41-52.

- [11] S. Miletić, D. Bogdanovic, D. Milanović, Advantages of Implementation the Process Model for Sustainable Business Operations of Mining Companies, Journal Mining and Metallurgy Institute Bor, No. 3, 2016, 71-82.
- [12] M. Ignjatović, S. Miletić, Evaluation of the Sustainable Development Benefits in the Serbian Mining Companies, Journal Mining and Metallurgy Engineering Bor, Vol.24, No 3-4, 2018, 87-156.
- [13] T.L. Saaty, The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, New York, 1980.

UPUTSTVO AUTORIMA

Časopis BAKAR izlazi dva puta godišnje i objavljuje naučne, stručne i pregledne radove. Za objavljivanje u časopisu prihvataju se isključivo originalni radovi koji nisu prethodno objavljivani i nisu istovremeno podneti za objavljivanje negde drugde. Radovi se anonimno recenziraju od strane recenzenta posle čega uredništvo donosi odluku o objavljivanju. Rad priložen za objavljivanje treba da bude pripremljen prema dole navedenom uputstvu da bi bio uključen u proceduru recenziranja. Neodgovarajuće pripremljeni rukopisi biće vraćeni autoru na doradu.

Obim i font. Rad treba da je napisan na papiru A4 formata (210x297 mm), margine (leva, desna, gornja i donja) sa po 25 mm, u Microsoft Wordu novije verzije, fontom Times New Roman, veličine 12, sa razmakom 1,5 reda, obostrano poravnat prema levoj i desnoj margini. Preporučuje se da celokupni rukopis ne bude manji od 5 strana i ne veći od 10 strana.

Naslov rada treba da je ispisan velikim slovima, bold, na srpskom i na engleskom jeziku. Ispod naslova rada pišu se imena autora i institucija u kojoj rade. Autor rada zadužen za korespondenciju sa uredništvom mora da navede svoju e-mail adresu za kontakt u fusnoti.

Izvod se nalazi na početku rada i treba biti dužine do 200 reči, da sadrži cilj rada, primenjene metode, glavne rezultate i zaključke. Veličina fonta je 10, italic.

Glavne reči se navode ispod izvoda. Treba da ih bude minimalno 3, a maksimalno 6. Veličina fonta je 10, italic.

Izvod i glavne reči treba da budu date i na engleski jezik.

Osnovni tekst. Radove treba pisati jezgrovito, razumljivim stilom i logičkim redom koji, po pravilu, uključuje uvodni deo s određenjem cilja ili problema rada, opis metodologije, prikaz dobijenih rezultata, kao i diskusiju rezultata sa zaključcima i implikacijama.

Glavni naslovi trebaju biti urađeni sa veličinom fonta 12, bold, sve velika slova i poravnati sa levom marginom.

Podnaslovi se pišu sa veličinom fonta 12, bold, poravnato prema levoj margini, velikim i malim slovima.

Slike i tabele. Svaka ilustracija i tabela moraju biti razumljive i bez čitanja teksta, odnosno, moraju imati redni broj, naslov i legendu (objašnjenje oznaka, šifara, skraćenica i sl.). Tekst se navodi ispod slike, a iznad tabele. Redni brojevi slika i tabela se daju arapskim brojevima.

Reference u tekstu se navode u ugličastim zagradama, na pr. [1,3]. Reference se prilažu na kraju rada na sledeći način:

[1] B.A. Willis, Mineral Processing Technology, Oxford, Pergamon Press, 1979, str. 35. (za poglavlje u knjizi)

[2] H. Ernst, *Research Policy*, 30 (2001) 143–157. (za članak u časopisu)

[3] www: <http://www.vanguard.edu/psychology/apa.pdf> (za web dokument)

Navođenje neobjavljenih radova nije poželjno, a ukoliko je neophodno treba navesti što potpunije podatke o izvoru.

Zahvalnost se daje po potrebi, na kraju rada, a treba da sadrži ime institucije koja je finansirala rezultate koji se daju u radu, sa nazivom i brojem projekta; ili ukoliko rad potiče iz magistarske teze ili doktorske disertacije, treba dati naziv teze/disertacije, mesto, godinu i fakultet na kojem je odbranjena. Veličina fonta 10, italic.

Radovi se šalju prevashodno elektronskom poštom ili u drugom elektronskom obliku.

Adresa uredništva je:

Časopis BAKAR

Institut za rudarstvo i metalurgiju

Zeleni bulevar 35, 19210 Bor

E-mail: nti@irmbor.co.rs ; ana.kostov@irmbor.co.rs

Telefon: 030/454-260; 030/454-108

Svim autorima se zahvaljujemo na saradnji.

INSTRUCTIONS FOR THE AUTHORS

COPPER Journal is published twice a year and publishes the scientific, technical and review paper works. Only original works, not previously published and not simultaneously submitted for publications elsewhere, are accepted for publication in the journal. The papers are anonymously reviewed by the reviewers after that the Editorial decided to publish. The submitted work for publication should be prepared according to the instructions below as to be included in the procedure of reviewing. Inadequate prepared manuscripts will be returned to the author for finishing.

Volume and Font Size. The paper needs to be written on A4 paper (210x297 mm), margins (left, right, top and bottom) with each 25 mm, in the Microsoft Word later version, font Times New Roman, size 12, with 1.5 line spacing, justified to the left and right margins. It is recommended that the entire manuscript cannot be less than 5 pages and not exceed 10 pages.

Title of Paper should be written in capital letters, bold, in Serbian and English. Under the title, the names of authors and their affiliations should be written. Corresponding author must provide his/her e-mail address for contact in a footnote.

Abstract is at the beginning of the paper and should be up to 200 words include the aim of the work, the applied methods, the main results and conclusions. The font size is 10, italic.

Keywords are listed below the abstract. They should be minimum 3 and maximum of 6. The font size is 10, italic.

Abstract and Keywords should be also given in English language.

Basic Text. The papers should be written concisely, in understandable style and logical order that, as a rule, including the introduction part with a definition of the aim or problem of the work, a description of the methodology, presentation of the obtained results as well as a discussion of the results with conclusions and implications.

Main Titles should be done with the font size 12, all capital letters and aligned to the left margin.

Subtitles are written with the font size 12, bold, aligned to the left margin, large and small letters.

Figures and Tables. Each figure and table must be understandable without reading the text, i.e., must have a serial number, title and legend (explanation of marks, codes, abbreviations, etc.). The text is stated below the figure and above the table. Serial numbers of figures and tables are given in Arabic numbers.

References in the text are cited in square brackets, e.g. [1,3]. References are enclosed at the end of the paper as follows:

[1] B.A. Willis, Mineral Processing Technology, Oxford, Pergamon Press, 1979, p. 35. (*for the chapter in a book*)

[2] H. Ernst, *Research Policy*, 30 (2001) 143–157. (*for the article in a journal*)

[3] <http://www.vanguard.edu/psychology/apa.pdf> (*for web document*)

Citation of the unpublished works is not preferable and, if it is necessary, as much as possible completed data source should be listed.

Acknowledgement is given, as needed, at the end of the paper and should include the name of institution that funded the given results in the paper, with the project title and number; or if the work is resulted from the master thesis or doctoral dissertation, it should give the title of thesis/dissertation, place, year and faculty/university where it was defended. Font size is 10, italic.

The manuscripts are primarily sent by e-mail or in other electronic form.

Editorial Address: Journal COPPER
Mining and Metallurgy Institute Bor
35 Zeleni bulevar, 19210 Bor
E-mail: nti@irmbor.co.rs; ana.kostov@irmbor.co.rs
Telephone: +381 30/454-260; +381 30/454-108

We are thankful for all authors on cooperation.

SADRŽAJ
CONTENS

Vladimir Milojković, Ljubiša Balanović, Dragan Manasijević,
Milan Gorgievski

**ISPITIVANJE TOPLLOTNE DIFUZIVNOSTI LEGURA Cu SA
Sn, Zn, Pb, Al I Ag**

INVESTIGATION OF THERMAL DIFFUSIVITY OF Cu ALLOYS
WITH Sn, Zn, Pb, Al AND Ag1

Vesna Krstić, Danijela Simonović, Stefan Đordjević,
Branka Pešovski, Tamara Urošević, Biserka Trumić, Zorica Sovrlić

**PREČIŠĆAVANJE OTPADNIH VODA SAVREMENIM METODAMA
BIOSORBCIJE I FITOREMEDIJACIJOM**

WASTE WATER PURIFYING WITH CONTEMPORARY BIOSORBTION
METHODS AND FITOREMEDIATION 19

Dragan Milanović, Suzana Dragulović, Vesna Conić,
Dragana Božić, Danijela Simonović

**DOBIJANJE OLOVA IZ BIOLUŽNOG OSTATKA
POLIMETALIČNE SIROVINE**

OBTAINING OF LEAD FROM THE BIOLEACHING RESIDUE OF
POLYMETALIC RAW MATERIAL31

Branislav Rajković, Zoran Ilić, Daniela Urošević

PRORAČUN I PRINCIP RADA RASHLADNOG SUŠAČA VAZDUHA

CALCULATION AND WORK PRINCIPLES OF THE AIR
REFRIGERATION DRYER37

Slavica Miletić, Dejan Bogdanović, Miroslav Ignjatović

**INOVATIVNI PRISTUP EVALUACIJE ZADOVOLJSTVA KORISNIKA U
RUDARSKIM KOMPANIJAMA**

INNOVATIVE APPROACH TO EVALUATION OF CUSTOMER
SATISFACTION IN MINING COMPANY45
