

Rudarsko-geološko-naftni zbornik	Vol. 20	str. 65 - 70	Zagreb, 2008.
----------------------------------	---------	--------------	---------------

UDK 628.44:621.928  
UDC 628.44:621.928

*Pregledni rad*  
*Review*

Jezik/Language : *Hrvatski/Croatian*

## UČINKOVITOST SEPARIRANJA METALNOG OTPADA U MAGNETSKOM SEPARATORU S VRTLOŽNIM STRUJAMA

### EFFICIENCY OF METAL SCRAP SEPARATION IN EDDY CURRENT SEPARATOR

GORDAN BEDEKOVIĆ, BRANKO SALOPEK, IVAN SOBOTA

*Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, 10000 Zagreb, Hrvatska*

**Ključne riječi:** metalni otpad, magnetska separacija s vrtložnim strujama, recikliranje

**Key words:** metal scrap, eddy-current separation, recycling

#### Sažetak

Magnetska separacija s vrtložnim strujama najčešće se koristi za izdvajanje nemagnetičnih metala (Al, Cu, Zn, Pb) iz krutog otpada, a također i za njihovo međusobno odvajanje. Tračni transporter doprema ulazni materijal na bubanj s magnetskim poljem. Promjenjivo magnetsko polje inducira vrtložne struje u vodljivim česticama (česticama metala). Interakcija između ovih struja i magnetskog polja uzrokuje elektrodinamičke sile koje djeluju na vodljive čestice, pa će se njihova putanja razlikovati od putanje nevodljivih čestica. Do separacije dolazi djelovanjem nekoliko sila (elektrodinamičke, gravitacijske i sile trenja). U radu su prikazani rezultati izdvajanja aluminija iz smjese metalnog otpada u magnetskom separatoru s vrtložnim strujama. Testiranje je izvedeno u pogonskim uvjetima. Rezultati pokazuju da je moguće postići iskorištenje korisne komponente od 99 % uz sadržaj aluminija u koncentratu od 89 %.

#### Abstract

Eddy-current separation is most often method used for the recovery of non-ferrous metals (Al, Cu, Zn, Pb) from solid wastes and also for separating non-ferrous metals from each other. The feed material comes to rotary drum and magnetic field by belt conveyer. The changing magnetic field induce eddy currents in conductive (metallic) particles. Because interaction between this currents and the magnetic field electrodynamic forces will act on conductive particles. Therefore the trajectories of conductive particles will be different from the trajectories of the non-conductive ones. Separation is a result of the combined actions of several forces (electrodynamic, gravitational and frictional). The paper presents results of aluminium recovery from mixture of metallic particles in eddy current separator. Testing were conducted under field condition. Results shows that is possible achieve recovery of 99 % and concentrate quality of 89 % of aluminium.

#### Uvod

Francuski fizičar Leon Foucault otkrio je sredinom 19. stoljeća električni fenomen vrtložnih struja, do kojeg dolazi prilikom gibanja (ili promjene) magnetskog polja preko vodiča, ili pak gibanja vodiča kroz magnetsko polje. Spomenuta relativna gibanja uzrokuju razdvajanje naboja (razliku potencijala) u vodičima, pri čemu dolazi do kružnog toka elektrona ili jednostavnije rečeno, struje unutar vodiča. Ovako nastale struje nazvane su vrtložne (ili Foucaultove) struje. Inducirane struje biti će to veće što je veća jakost i/ili brža promjena magnetskog polja, a također i što je veća električna vodljivost. Upravo ove struje osnova su na kojoj se temelji magnetska separacija s vrtložnim strujama.

Primjena ove separacije u rudarstvu započela je prije više od jednog stoljeća kada se upotrebljavala za

koncentraciju ruda koje su sadržavale samorodne metale (Valk et al., 1988). Od tada je razvijeno mnogo koncepata različitih separatora, a današnji konvencionalni separatori su tzv. dinamički ili bubnjasti separatori.

Iako princip elektromagnetske indukcije u vodljivim materijalima već dugo nalazi vrlo široku primjenu kod elektromotora i transformatora, jednako dugo je zapostavljan u smislu izdvajanja metala iz smjese drugih materijala. Posljednjih nekoliko desetljeća područje primjene ove separacije kontinuirano se širi tako da se danas upotrebljava za izdvajanje nemagnetičnih metala (Cu, Al, Pb, Zn) iz krutog otpada, kao i za njihovo međusobno odvajanje pri recikliranju automobilske i elektroničkog otpada, granuliranog kablenskog otpada, staklenog krša, usitnjenog drvnog otpada, pa i komunalnog otpada (Rem et al., 1997;

Zhang et al., 1998; Meier-Staude et al, 2002; Maraspin et al., 2004, Lungu, 2005). Danas se recikliranjem proizvodi 39 % aluminija, 32 % bakra, 74 % olova i 20 % cinka, pri čemu ušteda električne energije pri proizvodnji od recikliranog metala iznosi 95 % za aluminij, 85 % za bakar, 60% za olovo i 63 % za cink. U budućnosti se može očekivati znatan porast tokova otpada koji će sadržavati sitne čestice metala (Rem et al. 2000).

Princip rada magnetskog separatora s vrtložnim strujama prikazan je na slici 1. Separator se sastoji od dva bubnja međusobno povezanih transportnom trakom. Prvi bubanj je pogonski, a u drugom je smješten rotor s permanentnim magnetima. Transportna traka doprema materijal do drugog bubnja, pri čemu materijal dolazi u promjenjivo magnetsko polje koje u česticama metala inducira vrtložne struje.



Slika 1. Separacija u magnetskom separatoru s vrtložnim strujama  
Figure 1 Separation in eddy current separator

Međudjelovanje između magnetskog polja čestice u kojoj su inducirane vrtložne struje i magnetskog polja rotora rezultira elektrodinamičkim silama na vodljive čestice. Trajektorija čestica po napuštanju bubnja određena je kombinacijom sila gravitacije, sile trenja između čestica i trake, sile otpora kretanju zrakom, te elektrodinamičke sile. Sila koja izdvaja vodljive čestice (čestice metala) od ostalog materijala naziva se Lorentzova sila, tj. sila magnetskog polja na magnetsko polje čestice uzrokovano vrtložnim strujama unutar čestice. Zbog toga će slabo vodljivi materijali ostati na traci i nastojati zadržati putanju po inerciji i padati blizu bubnja, a vodljivi materijali biti će podignuti s trake i odbačeni dalje od bubnja (Schlett et al., 2002). Dakle, do separacije u prvom redu dolazi na temelju razlike u električnoj vodljivosti.

Upotreba permanentnih magneta omogućila je primjenu vrlo jakih magnetskih polja uz značajno smanjenje troškova rada. U ovim separatorima prerađuju se čestice različitih materijala i veličina. Uređaji za preradu malih čestica imaju velik broj magnetnih polova male širine, dok uređaji za velike čestice imaju nekoliko velikih magnetnih polova. Kod ovih posljednjih uređaja poteškoće pričinjava visoka cijena zbog duljine permanentnih magneta (Lungu, 2005). Glavni problem ove vrste separatora je separacija čestica manjih od 5 mm. Razlog otežanog izdvajanja malih čestica u konvencionalnim separatorima leži u činjenici da Lorentzova sila (tj. tangencijalna sila) proizvodi akceleraciju manju od sile gravitacije. Zbog toga

prevladavaju sile trenja koje djeluju u smjeru suprotnom od tangencijalne sile. Jedno od rješenja traženo je u izradi posebnih rotora s mnogo malih polova da bi se

povećala frekvencija i gradijent polja u području čestica. Drugo rješenje usmjereno je prema upotrebi momenta magnetskog rotora na čestice metala u ulaznom materijalu da bi se napravio separacijski efekat tj. upotreba tzv. Magnus efekta odnosno sile koja djeluje okomito na trajektoriju tijela koje rotirajući pada u fluidu (Rem et al, 2002, Fraunholz, 2002). Budući da se ta sila dobiva iz fluida oko čestice nije potrebno doziranje u monosloju i doziranje može biti više od 6 t/h po metru širine rotora. Nedostatak tzv. Magnus separatora je ograničeno iskorištenje koje obično iznosi od 70 do 80 % za aluminij, pa i manje za slabije vodljive metale ili metale veće gustoće.

### Teorija separacije u magnetskom separatoru s vrtložnim strujama

Kod svih dinamičkih separatora promjenjivo magnetsko polje inducira vrtložne struje u vodljivim nemagnetičnim česticama koje se gibaju preko bubnja i prolaze nehomogenim magnetskim poljem. Ove struje uzrokovane su Faradayovim zakonom indukcije i inducirane su u čestici kao reakcija na magnetsko polje koje se brzo mijenja u vremenu tj. nastaju kao reakcija na fluktuacije polja.

Kada se čestica giba kroz magnetsko polje podvrgnuta je promjenama veličine i orijentacije polja uslijed njezinog translacijskog i rotacijskog gibanja. Promjene magnetskog polja koje djeluju na česticu koja se giba bliže rotacijskom bubnju uzrokovane su na temelju dva gibanja: rotacijom bubnja, te translacijskim i rotacijskim gibanjem čestice u aktivnoj zoni magnetskog polja (Rem et al., 1997). Na vodljivu česticu djeluje Lorentzova sila, odnosno elektrodinamička sila magnetskog polja na magnetsko polje čestice uzrokovano vrtložnim strujama unutar čestice. Lorentzova sila  $f$  na mali volumen  $dV$  vodljive čestice koja nosi struju gustoće  $j$  u magnetskom polju  $B$  iznosi (Meier-Staude et al., 2002; Lungu et al., 2001):

$$f = j \cdot BdV \quad (1)$$

Za poznatu distribuciju gustoće struje unutar čestice, resultantna sila dobiva se integracijom izraza (1):

$$F = \int_V \cdot f dV \quad (2)$$

Istovremeno, polje djeluje na česticu metala momentom  $T$  (Meier-Staude et al., 2002; Lungu et al., 2001):

$$T = \int_V r \cdot f dV \quad (3)$$

gdje je  $r$  vektor koordinate u odnosu na težište čestice.

Ako je čestica dovoljno mala može se razmatrati kao magnetski dipol i varijacije primijenjenog polja unutar čestice su male. U tom se slučaju i sila  $F$  i moment  $T$  mogu izraziti pomoću gradijenta polja i magnetskog momenta čestice  $M$  (Meier-Staude et al., 2002; Lungu et al., 2001):

$$F = M \cdot \nabla B^a = M_x \nabla B_x^a + M_y \nabla B_y^a + M_z \nabla B_z^a \quad (4)$$

$$T = M \nabla B^a \quad (5)$$

gdje je

$$M = \frac{1}{2} \int_V r \cdot j dV \quad (6)$$

Elektrodinamičke separacijske sile, tj. radijalna  $F_r$  i tangencijalna komponenta  $F_t$  kao i moment  $T$  na vodljivu česticu blizu bubnja iznose (Braam et al., 1988; Schloemann, 1975; van der Valk et al., 1986):

$$F_r = -mkv_r \quad (7)$$

$$F_t = mk [(\omega - \Omega)R \pm v_t] \quad (8)$$

$$T = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot F_t \quad (9)$$

gdje je  $F_r$  radijalna komponenta elektrodinamičke sile  $F$ ;  $F_t$  tangencijalna komponenta elektrodinamičke sile  $F$ ;  $m$  masa čestice;  $v_r$  radijalna komponenta brzine ulazne čestice;  $\omega$  kutna brzina bubnja;  $\Omega$  kutna brzina čestice;  $(\omega - \Omega)$  kutna brzina polja separatora;  $R$  radijus čestice;  $\lambda$  period magnetizacije (širina para polova);  $k$  je faktor koji se izračunava prema izrazu (10).

$$k = 0,5 \cdot (\sigma/\rho) \cdot S \cdot (\cdot B)^2 \quad (10)$$

gdje je  $\sigma$  električna vodljivost,  $\rho$  gustoća čestice,  $S$  je faktor oblika koji ovisi o obliku i dimanzijama čestice, a  $\nabla B$  je gradijent intenziteta toka u aktivnoj zoni polja. Separacija u velikoj mjeri ovisi o tzv. separacijskom faktoru  $(\sigma/\rho)$  koji predstavlja omjer električne vodljivosti  $\sigma$  i gustoće čestice  $\rho$ . Električna vodljivost je značajka materijala da provodi električnu struju i jednaka je recipročnoj vrijednosti električnog otpora. U tablici 1 nalazi se pregled vrijednosti separacijskog faktora za materijale koji se najčešće odvajaju magnetskom separacijom s vrtložnim strujama.

**Tablica 1.** Separacijski faktor za pojedine materijale (Lungu et al., 2001)

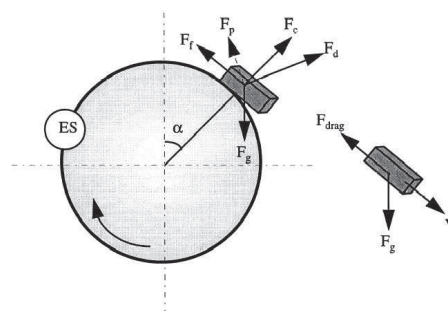
**Table 1** The separation factor  $(\sigma/\rho)$  for some materials

Materijal	Separacijski faktor $\sigma/\rho \times 10^3$ ( $m^2/\Omega kg$ )
Aluminij	13,1
Bakar	6,6
Cink	2,4
Mesing	1,7
Olovo	0,4

Izraz za moment  $T$  koji uzrokuje rotaciju čestice glasi:

$$T = -c |B|^2 V (\omega - \Omega) \sigma d^2 \quad (11)$$

gdje je  $B$  magnetska indukcija na položaju čestice,  $V$  volumen čestice, a  $c$  faktor ovisan o obliku i orijentaciji čestice. Faktor  $c$  za sferične čestice iznosi 1/40, za cilindrične čestice 1/16 (orijentirane paralelno) ili 3/64 (orijentirane okomito), a za plosnate čestice 1/12 (orijentirane paralelno) ili 1/64 (orijentirane okomito) s obzirom na njihovu os simetrije u odnosu na os rotacije magnetskog bubnja (Lungu, 2005).



**Slika 2.** Sile koje djeluju na česticu na bubnju i nakon napuštanja bubnja (ES) (Zhang S. et al., 1999)

**Figure 2** Co-acting forces on a particle before leaving the external shell (ES) and after (Zhang S. et al., 1999)

Slika 2 prikazuje sile koje djeluju na česticu tijekom magnetske separacije s vrtložnim strujama na bubnju i nakon napuštanja bubnja. Čestica putuje brzinom  $v$ , a putanja je određena međudjelovanjem svih sila na česticu. Sila gravitacije  $F_g$  izračunava se prema izrazu

$$F_g = LWT\rho_p g \quad (12)$$

gdje je  $L$  duljina čestice,  $W$  širina čestice,  $T$  debljina čestice,  $\rho_p$  gustoća čestice i  $g$  ubrzanje sile teže.

Centrifugalna sila  $F_c$  izračunava se prema izrazu

$$F_c = LWT\rho_p R\omega^2 \quad (13)$$

gdje je  $R$  radijus vanjskog bubnja, a  $\omega$  kutna brzina čestice.

Sila trenja  $F_f$  izračunava se prema slijedećem izrazu:

$$F_f = \mu F \quad (14)$$

gdje je  $\mu$  koeficijent trenja, a  $F$  sila okomita na površinu kontakta između čestice i bubnja. U usporedbi s drugim silama ova sila je beznačajna.

Sila magnetskog okretanja ili sila odbacivanja  $F_d$  rezultat je interakcije između vrtložnih struja induciranih u vodljivim česticama i prostorno-vremenskog varijabilnog magnetskog polja:

$$F_d = KB_e^2 fm \frac{\sigma}{\rho} p \quad (15)$$

gdje je  $K$  složeni koeficijent ovisan o dizajnu magnetskog sustava bubnja,  $B_e$  efektivna magnetska indukcija,  $f$  frekvencija magnetskog polja,  $m$  masa vodljive čestice,  $\sigma$  električna vodljivost čestice,  $\rho$  gustoća čestice i  $p$  složeni koeficijent ovisan o dimenzijama, obliku i orijentaciji čestice u magnetskom polju.

Sila  $F_p$  je sila međudjelovanja čestica odnosno interakcije kao npr. sudaranje čestica i naskakivanje čestica jedne na drugu, što ovisi o uvjetima doziranja materijala. Uobičajeno je da konvencionalni separatori imaju doziranje u monosloju, pa se u tom slučaju sile interakcije između čestica mogu zanemariti.

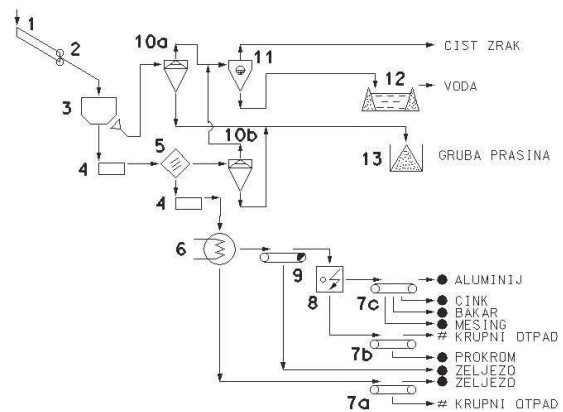
Sila otpora  $F_{drag}$  ili aerodinamična sila javlja se kada čestica napušta vanjski bubanj. Ova sila se može zanemariti zbog većih dimenzija čestica koje dolaze na separator.

Izraz 15 pokazuje da je sila odbacivanja proporcionalna brzini rotacije magnetskog bubnja (tj. frekvenciji magnetskog polja) za česticu određene veličine i oblika. Zbog toga će brža rotacija magnetskog bubnja uzrokovati jaču silu odbacivanja. Ako je ova sila veća od ostalih sila koje djeluju pri separaciji, doći će do selektivnog izdvajanja čestica metala (tj. vodljivih čestica) od nemetalnih (nevodljivih) čestica. U slučaju separiranja različitih metala ulazni materijal mora biti usko klasiran. Naime, sila odbacivanja na malu česticu aluminija biti će jednaka ili čak veća od sile odbacivanja na npr. veliku česticu cinka. U ovakvom slučaju ne može doći do separacije dvaju različitih metala.

### Ekperimentalni dio

U postrojenju za recikliranje metala (tvrtke C.I.O.S d.o.o.) prerađuje se sav metalni otpad, pri čemu je najveći udio starih automobila. Učinkovitost recikliranja (a time i cijena) značajno ovise o složenosti otpada što u slučaju otpadnih automobila znači sofisticiraniju (i skuplju)

opremu, te niže iskorištenje i kvalitetu dobivenih produkata (Salopek et al., 2006). Preduvjet za uspješnu primjenu pojedinog separacijskog postupka je da su pojedine materijalne komponente međusobno slobodne odnosno da su veze između njih raskinute. Određivanje učinkovitosti magnetskog separatora s vrtložnim strujama provedeno je u pogonskim uvjetima na materijalu koji dolazi u separator. Budući da je taj materijal prethodno prošao kroz postrojenje, radi boljeg razumijevanja potrebno je ukratko opisati tehnološki proces recikliranja (slika 3). Svaki imalo složeniji proces recikliranja obuhvaća tri glavna postupka: sitnjenje, klasiranje i sortiranje odnosno separiranje (Salopek et al., 2005).



Slika 3. Segregacijska shema recikliranja metalnog otpada (Salopek et al., 2001)

Figure 3 Segregation scheme of metal scrap recycling (Salopek et al., 2001)

Otpad prihvatnim žlijebom (1) dolazi do valjaka (2) koji ga prešaju i uvode u drobilicu (3). Sitnjenjem se postiže raščin ili oslobađanje „sraslih“ materijala, koji nakon sitnjenja tvore smjesu međusobno slobodnih komada. Materijal usitnjen na klasu -10 mm odlazi na klasiranje u protustrujni zračni klasifikator (5) koji daje dva proizvoda: „laki“ i „teški“. Tekstil, plastika, guma i drugi materijali od kojih se sastoji „laki“ proizvod izdvajaju se putem sustava za otprašivanje koji se sastoji od aerociklona (10a i 10b) i mokrog skrabera (11). „Teški“ proizvod koji se sastoji uglavnom od metala odlazi na bubnjasti magnetski separator (6) koji odvaja željezo i čelik na probirnu traku (7a). Ostali metali odlaze na separaciju u magnetski separator s vrtložnim strujama (8) koji daje dva proizvoda na probirnim trakama (7b i 7c). Neposredno prije ovog separatora nalazi se izdvajač metala (9) koji uklanja eventualno zaostale komade željeza i čelika.

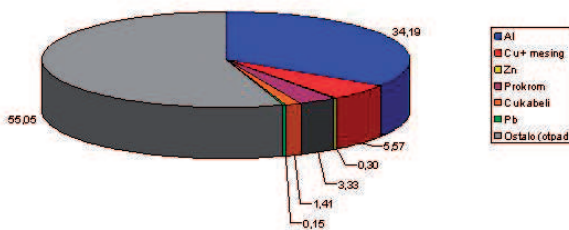
Parametri kojima se regulira rad ovog separatora su brzina trake, položaj i brzina rotora s magnetima (jakost i frekvencija magnetskog polja), te položaj separacijskog noža za razdjeljivanje produkata. Separator je bio podešen za izdvajanje aluminija kao korisne komponente. Obavljena su tri uzorkovanja pri čemu je vrijeme pojedinačnog uzorkovanja iznosilo 10 minuta. Za svako uzorkovanje određena je masa ulaznog materijala, kao i mase dvaju proizvoda separacije (koncentrat i jalovina).

**Rezultati**

Separiranjem se ovisno o konstrukciji separatora najčešće dobivaju dva, a ponekad i tri proizvoda.

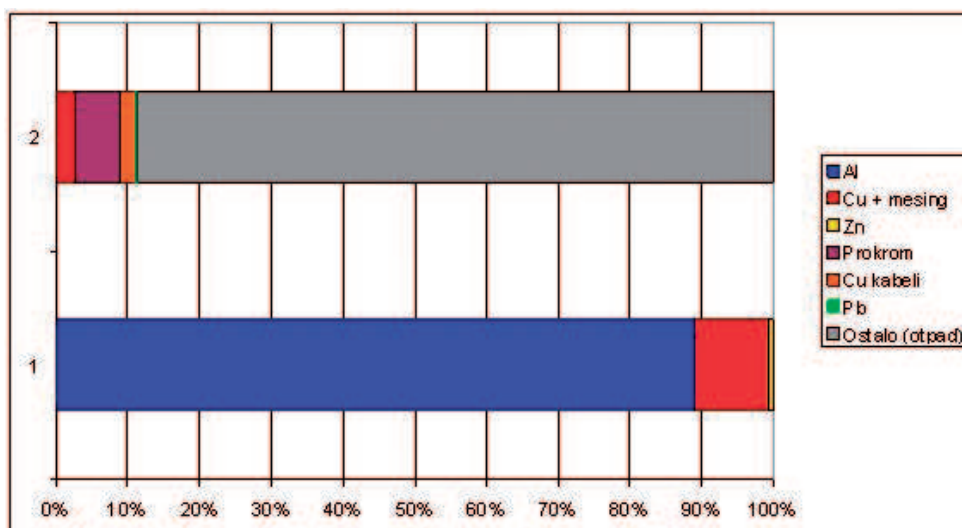
U svakom separacijskom postupku nastoji se izdvojiti što je moguće više korisne komponente iz ukupne mase otpada uz istovremeno postizanje što više kvalitete izdvojenog proizvoda.

**Slika 4.** Sastav ulaznog materijala izražen u postocima  
*Figure 4* Composition of feed material express in percentage



**Tablica 2.** Rezultati separacije u magnetskom separatoru s vrtložnim strujama  
*Table 2* Results of separation in a eddy current separator

Materijal	Koncentrat (kg)			Jalovina (kg)		
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 1	Test 2	Test 3
Al	59,50	68,78	65,25	0,00	0,00	0,00
Cu + mesing	8,50	5,68	7,50	3,75	2,85	3,25
Zn	1,20	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00
Prokrom	0,00	0,00	0,00	7,20	5,43	6,20
Cu kabeli	0,00	0,00	0,00	3,25	2,80	1,95
Pb	0,00	0,00	0,00	0,35	0,48	0,00
Ostalo (otpad)	0,00	0,00	0,00	99,58	101,20	110,80
Ukupno	69,20	74,46	73,25	114,13	112,76	122,20



**Slika 5.** Sastav produkata magnetskog separatora s vrtložnim strujama: koncentrat (1) i jalovina (2)

*Figure 5* Composition of eddy current separator products: concentrate (1) and gangue (2)

Iz dijagrama na slici 4 vidi se da maseni udio aluminija u ulaznom materijalu iznosi 34,19 %, a u koncentratu

gotovo 90 % (slika 5). Osim aluminija u koncentratu se nalazi i cink. Približno dvije trećine bakra i mesinga (legura



bakra s cinkom kao glavnim legirajućim elementom) završilo u koncentratu, a jedna trećina u jalovini. To je ujedno i jedini materijal koji se separirao u oba proizvoda. U jalovini je završio prokrom (legura čelika s kromom kao glavnim legirajućim elementom), bakreni kablovi, olovo, te ostali materijal.

Učinkovitost separacije može se pratiti na temelju tri tehnološka pokazatelja: maseno iskorištenje, iskorištenje korisne komponente u koncentratu i kvaliteta koncentrata. Maseno iskorištenje predstavlja odnos mase koncentrata i mase ulaza izraženo u postocima:

$$I_m = 100 \cdot \frac{K}{U} = 100 \cdot \frac{72,31}{188,68} = 38,3 \% \quad (16)$$

gdje je  $I_m$  maseno iskorištenje (kg),  $K$  masa moncentrata (kg) i  $U$  masa ulaznog materijala (kg).

Iskorištenje korisne komponente  $I_k$  predstavlja odnos korisne komponente u koncentratu i te iste komponente u ulaznom materijalu (materijal koji ulazi u separator) i također se izražava u postocima. U slučaju da otpad sadrži više korisnih komponenti one se izdvajaju uzastopno jedna za drugom, počevši od one koja se lakše izdvaja, a iskorištenje se računa zasebno za svaku od njih.

$$I_k = 100 \cdot \frac{K \cdot k}{U \cdot u} = 100 \cdot \frac{72,31 \cdot 89,21}{188,68 \cdot 34,19} = 99,99 \% \quad (17)$$

gdje je  $K$  masa moncentrata (kg) i  $U$  masa ulaznog materijala (kg), a  $k$  i  $u$  su postotni sadržaji korisne komponente (u ovom slučaju aluminijska) u koncentratu i ulazu. Čistoća ili kvaliteta koncentrata odražava sadržaj korisne komponente u koncentratu:

$$K_k = 100 \cdot \frac{m_{Al}}{K} = 100 \cdot \frac{64,51}{72,31} = 89,21 \% \quad (18)$$

Na temelju izračunatih vrijednosti tehnoloških parametara vidi se da 38 % od ulaznog materijala završi u koncentratu, pri čemu taj koncentrat sadrži 89 % aluminijska, dok je iskorištenje korisne komponente u koncentratu iznosilo praktički 100 %.

## Zaključak

Magnetska separacija s vrtložnim strujama danas nalazi primjenu za izdvajanje metala iz krutog otpada, te za razdvajanje različitih vrsta metala pri recikliranju starih automobila, elektroničkog otpada itd. U slučaju međusobnog razdvajanja metala materijal mora biti usko klasiran. Čestice metala veće od 5 mm vrlo dobro se mogu razdvajati u ovom separatoru. Ispitivanja provedena u pogonskim uvjetima potvrdila su da je ovakav separator idealno rješenje za izdvajanje aluminijska iz smjese metala. Iako je dobiveno iskorištenje mase koncentrata svega 38 %, iskorištenje korisne komponente u koncentratu iznosi približno 100 %, što znači da je praktično sav aluminij iz ulaznog materijala završio u koncentratu. Sadržaj aluminijska u koncentratu iznosio je 89 %. Ostalih 11 % čine većim dijelom bakar i mesing, a manjim dijelom cink (0,8 %). Svi ovi materijali imaju veći separacijski faktor ( $\sigma/p$ ) od materijala koji su završili u jalovini. Naknadnim

ručnim probiranjem na probirnim trakama dolazi do potpunog razdvajanja pojedinih vrsta metala.

Accepted: 02.11.2008.

Received: 15.09.2008.

## Literatura

- Braam, B.C., Van der Valk, H.J.L., Dalmijn, W.L., (1988): Eddy-current separation by permanent magnets Part II: Rotating disc separators. Resources, Conservation and Recycling, 1, 3.
- Fraunholz, N., Rem, P.C., Haeser, P.A.C.M. (2002): Dry magnus separation. Minerals Engineering, 15, 45–51.
- Lungu, M., Schlett, Z. (2001): Vertical drum eddy-current separator with permanent magnets. International Journal of Mineral Processing, 63, 207–216.
- Lungu, M. (2005): Separation of small nonferrous particles using an angular rotary drum eddy-current separator with permanent magnets. International Journal of Mineral Processing, 78, 22–30.
- Maraspin, F., Bevilacqua, P and Rem P. (2004): Modelling the throw of metals and nonmetals in eddy current separations. International Journal of Mineral Processing, 73, 1–11.
- Meier-Staude, R., Schlett, Z., Lungu, M. And Baltateanu, D. (2002): A new possibility in Eddy-current separation. Minerals Engineering, 15, 287–291.
- Rem, P.C., Leeser, A.J. and Akker, A.J. (1997): A model for eddy-current separation. International Journal of Mineral Processing, 49, 193–200.
- Rem, P.C., Zhang, S., Forssberg, E. And De Jong, T.P.R. (2000): The investigation on separability of particles smaller than 5 mm by eddy current separation technology – Part II: Novel design concepts. Magnetic and Electrical Separation, 10, 85–105.
- Rem, P.C., Fraunholz, N., Schokker, E.A. (2002): Magnus separation. Separation Science and Technology, 37, 3647–3660.
- Salopek, B and Bedeković, G. (2001): The recycling of metallic scrap in Croatia. 6<sup>th</sup> Southern Hemisphere Meeting on Mineral Technology, Vol. 2, 690–693, Rio de Janeiro.
- Salopek, B., Bedeković, G., Sobota, I. (2005): The Comminution of Solid Waste, Annual 2005 of the Croatia Academy of Engineering, XX, 139–150, Zagreb.
- Salopek, B, Bedeković, G., Sobota, I. (2006): Utjecaj složenosti proizvoda na učinkovitost recikliranja. Savjetovanje Tehnologije zbrinjavanja otpada, 39–43, Varaždin.
- Schlett, Z. and Lungu, M. (2002): Eddy-current separator with inclined magnetic disc. Minerals Engineering, 15, 365–367.
- Schloemann, E. (1975): Separation of nonmagnetics metals from solid waste by permanent magnets I. Theory. Journal of Applied Physics, 46 (11), 5012.
- Van der Valk, H. J. L., Braam, B.C, Dalmijn, W. L. (1986): Eddy-current separation by permanent magnets Part I: theory. Resources, Conservation and Recycling, 12, 233.
- Van der Valk, H. J. L., Dalmijn, W. L. And Duyvesteyn, W.P.C. (1998): Eddy-current separation methods with permanent magnets for the recovery of non-ferrous metals and alloys. Erzmetall, 41, 266–274.
- Zhang, S., Forssberg, E, Arvidson, B and Moss W. (1998): Aluminium recovery from electronic scrap by High-Force eddy-current separators. Resources, Conservation and Recycling, 23, 225–241.
- Zhang, S., Forssberg, E, Arvidson, B and Moss W. (1999): Separation mechanisms and criteria of a rotating eddy-current separator operation. Resources, Conservation and Recycling, 25, 215–232.