

BRANISLAV MARKOVIĆ¹, MIROSLAV SOKIĆ¹,
ILIJA ILIĆ², VASO MANOJLOVIĆ¹, ZVONKO GULIŠIJA¹,
DRAGANA ŽIVKOVIĆ³, NADA ŠTRBAC³

Originalni naučni rad
UDC:628.4.004.8
doi:10.5937/ZasMat1502224M

Primena eksergijske analize u reciklažnim tokovima

Materijali za recikliranje uvek sadrže izvestan stepen nečistoća. Prisustvo nečistoća tj. kontaminacija u reciklažnim tokovima izaziva promenu u izvornom sastavu materijala za reciklažu. Usled toga, kvalitet materijala može se smanjivati u svakom narednom koraku reciklaže. Pored toga, resursi nižeg kvaliteta proizvedeni su iz resursnih tokova koji su u izvornom obliku imali viši kvalitet. Ovakvi gubici kvaliteta ne mogu da se mere masenim bilansima, isto kao što se degradacija kvaliteta ne može prikazati samo merenjem mase. Za proračun svih gubitaka prouzrokovanih reciklažnom kontaminacijom, svi dalji procesi reciklaže potrebni da bi se materijali vratili nazad u resursne cikluse moraju biti uključeni. U ovom radu prikazan je metod za izračunavanje eksergijskog sadržaja i eksergijskog gubitka metalnih rastvora u toku iskorišćenja i reciklaže. Gubici pripisani reciklaži ili tačnije materijalni gubici, gubici usled kontaminacije drugim metalima i posledično potreba za razblaživanjem, mogu se koristiti kao indikatori gubitka kvaliteta materijala i efikasnosti korišćenja resursa u proizvodnim sistemima. Dakle, ovde je eksergija predložena kao mera efikasnosti korišćenja resursa. U radu su proračuni eksergijskih gubitaka tokom reciklaže prikazani na primeru aluminijumskog otpada.

Ključne reči: eksergija, gubici, reciklažna kontaminacija, degradacija kvaliteta, efikasnost resursa

1. UVOD

Dizajn modernih industrijskih proizvoda je takav da oni predstavljaju spoj velikog broj različitih materijala povezanih u više ili manje složene sklopove. Zbog toga bi kompletna demontaža ovakvih istrošenih proizvoda bila preskupa. Umesto toga u pogonima za reciklažu primenjuju se procesi usitnjavanja i razdvajanja, kako bi se iskoristili materijali iz tih proizvoda. Usitnjavanje potrošačkih proizvoda obično se naziva šrederovanje. Tokom šrederovanja, proizvodi se lome u manje komade, da bi se oslobodili materijali sadržani u njima. Međutim, spojevi između različitih materijala često nisu potpuno razdvojeni, zbog čega se javljaju strane materija u toku iskorišćenja, odnosno dolazi do kontaminacije reciklažnih tokova i pojave nečistoća u odnosu na originalni materijal. Ove pojave, nazvane fenomenom oslobađanja date su u radu Castro-a i saradnika [1].

Kao što je prikazano u radu Castro-a i saradnika [2], mnoge kombinacije materijala su nekompatibilne za reciklažu, jer mogu dovesti do gubitka jednog ili oba materijala. U mnogim slučajevima, kontaminacija nastala zbog nepotpunog oslobađanja materijala tokom šrederovanja, degradira reciklirani materijal koji gubi svojstva i ne može da se koristi u originalnoj primeni.

Adrese autora: ¹Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd, ²Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, ³Tehnički fakultet u Boru, Univerzitet u Beogradu, Bor, Srbija

Rad primljen: 10. 02. 2015.

Rad prihvaćen: 28. 03. 2015.

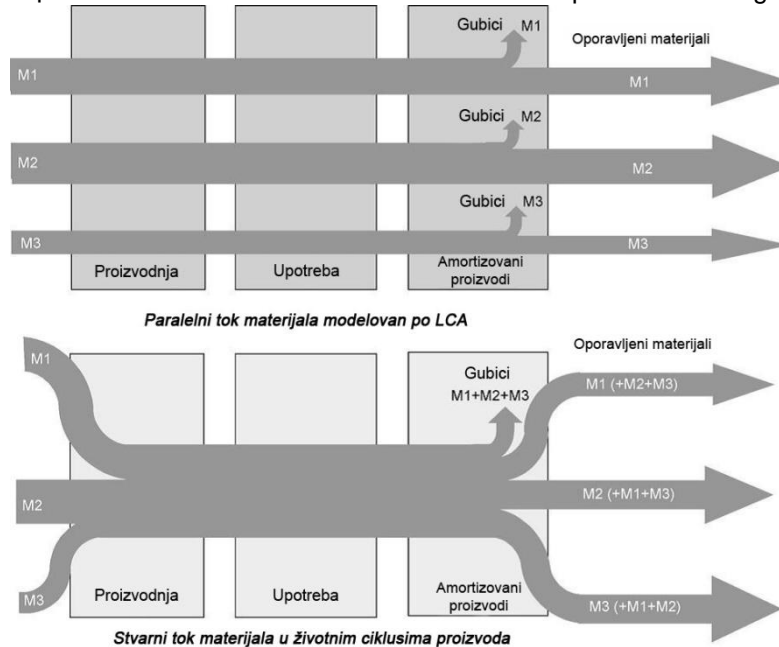
Tipično za reciklirajuću kontaminaciju je da se resursi ne gube iz proizvodnog resursnog ciklusa, ali njihov kvalitet opada nakon svakog životnog ciklusa. Ovde se životni ciklus definiše kao lanac procesa potrebnih za proizvodnju materijala i proizvoda, njihovog korišćenja, održavanja i konačnog odlaganja, kada se sadržani materijali vraćaju kroz reciklažu ili odlažu. Uobičajeno rešenje za kontaminaciju je dodavanje visoko čistih primarnih resursa tokom recikliranja da bi se razblažile neželjene nečistoće, i time doveo materijal na viši kvalitet.

Gubici kvaliteta tokom reciklaže ne mogu biti pravilno opisani metodologijama standardne procene životnog ciklusa (LCA). Ove metodologije modeluju resursne tokove kao nezavisne jedan od drugog i iskorišćenje materijala tokom reciklaže računaju kao izbegavanje proizvodnje ekvivalentne količine materijala istog kvaliteta.

Međutim u realnom okruženju resursi ne teku paralelno, već se u stvari mešaju u fazi proizvodnje (spojeni u jednom proizvodu) i kasnije se ponovo razdvajaju u izvesnoj meri tokom recikliranja. Oporavljeni materijali uvek sadrže izvesne kontaminacije tj. nečistoće. Ovo je ilustrovano na slici 1 preko sastava oporavljenog materijalnog toka: M1 + M2 + M3, sa različitim odnosima M1, M2 i M3, u zavisnosti od materijalnog toka [3]. Ove kontaminacije mogu izazvati probleme tokom reciklaže i uvek dovode do gubitaka kvaliteta oporavljenih materijala. Dakle sam maseni balans ne može da pruži potpunu sliku o efikasnosti korišćenja resursa, posebno u slučaju složenih proizvoda gde se koriste različite vrste materijala i tehnologije spajanja. Stoga je potrebna mera tj. veličina koja može da objasni odnosno proračuna gubitke kvaliteta tokom reciklaže.

Eksergija nudi veliki potencijal za analize sistema u većini naučnih oblasti. Ali iako su eksergijski bilansi u širokoj upotrebi, paralelno sa energetskim bilansima u optimizaciji hemijskih postrojenja, termodinamici procesa i sistema snabde-

vanja energijom, a od nedavno i u ekološkim naukama [4-11], ovaj korisni koncept još uvek nije šire poznat i zbog toga je dosta apstraktan za dobar deo naučne javnosti. Zbog toga ovaj rad ima i izvestan stepen edukativnog karaktera.



Slika 1 - Paralelni tok materijala modelovan po LCA i stvarni tok materijala u životnim ciklusima proizvoda [3]

Metod je razvijen na Univerzitetu Twente koji kombinuje proračune eksergijskih gubitaka sa metodologijom LCA. Ovaj metod se naziva Eksergijska procena životnog ciklusa (ELCA) i stoga proširuje obim LCA na opis iscrpljenosti sadržaja eksergije u sistemima [12]. ELCA je analiziran na svojim dodatnim vrednostima uporedno sa LCA. Zaključci su da rezultati za ispitivane sisteme neznatno variraju, što rezultira u istom redosledu preferencijala, ali da se u slučaju drugih sistema gde iscrpljenost deficitarnih materijala igra veću ulogu, rezultati mogu razlikovati. Utvrđeno je da je glavna prednost ELCA mogućnost davanja uvida o tome gde se javljaju gubici, i na taj način da se cilja na procese gde je potrebno da se urade poboljšanja [13]. Metod predstavljen u ovom radu proširuje obim ELCA na detaljniju analizu gubitaka u složenim materijalnim sistemima, zbog mogućnosti opisivanja interakcije između materijala.

2. EKSERGIJA KAO MERA GUBITAKA KVALITETA MATERIJALA TOKOM RECIKLIRANJA

2.1. Eksergija i efikasnost resursa

Eksergiju možemo posmatrati kao meru raspoložive energije [14]. Kombinacija prvog

$$dU = \delta Q + \delta W \quad (1)$$

i drugog

$$dS = \delta Q / T \quad (2)$$

zakona termodinamike dovela je do definicije koncepta eksergije, koju je uveo Rant 1953 [14]. Eksergija (\dot{E}) određenog energenta ili materije ukazuje na njegovu mogućnost ili sposobnost da proizvede rad, odnosno da izazove promene u sistemu tj. u lokalnom okruženju [15]. Na osnovu toga eksergija sistema može biti definisana opštom jednačinom [15]:

$$\dot{E} = W = U_1 - U_2 - T_0(S_1 - S_2) \quad (J) \quad (3)$$

gde je: U unutrašnja energija sistema. Za razliku od energije, eksergija se troši u svim realnim procesima u kojima se entropija proizvodi. Eksergijska potrošnja se odnosi na zbir proizvedene entropije [15]:

$$\Delta \dot{E} = T_0 \Sigma \Delta S \quad (4)$$

gde je: T_0 referentna temperatura a S je entropija sistema.

Kada se govori o trošenju resursa, može se tvrditi da ono što se potroši nije ni materija ni energija već korisna energija, odnosno eksergijski sadržaj resursa [13,14], i zbog toga se navodi da je eksergija krajnji ograničavajući resurs. U ovom prikazu, eksergijski gubici u proizvodnim sistemima mogu poslužiti kao mera "iscrpljenosti", a time i efikasnosti korišćenja resursa proizvodnih sistema.

Praktična teškoća eksergijske analize je da zahteva definisanje referentnog stanja. Karakteristika prirodnih sistema je da je referentno stanje po-

sebnno teško definisati i da nije u skladu sa zahtevima teorijskog referentnog stanja-idealnog stanja tj. nije u ravnoteži i ima lokalnih i vremenskih odstupanja-gradijenata [16,11]. U ovom radu će se koristiti referentno stanje koje su definisali Szargut i saradnici [17].

2.2. Eksergijski sadržaj materijala

Struktura materijala određuje njegova svojstva, a time i upotrebljivost materijala za određenu namenu. Koristan materijal ima normalno nižu entropiju od okoline [17]. Kada materijali više ne mogu da odgovaraju za određenu upotrebu usled smanjenja svojstava, tada se kaže da je njihov "kvalitet" niži. Ovaj niži kvalitet je zbog činjenice da su tada atomi u strukturi materijala raspoređeni na takav način da se njegova svojstva smanjuju. Kada se kontaminacije tj. nečistoće uvode u materijale tokom reciklaže, entropija materijala se povećava jer će se nečistoće mešati, uplićući se u strukturu materijala i ponekad i reagovati sa drugim jedinjenjima, i zbog toga stvarati "manje uređenu" strukturu.

Eksergija (\dot{E}) je termodinamička mera za promene u strukturi materijala. Zbog toga, eksergijski gubici mogu opisati gubitke kvaliteta materijala tokom recikliranja.

Za specifične primene, jednačina (4) može se dalje razvijati u različite oblike [12]. Za primenu na izračunavanje eksergijskog sadržaja resursa, hemijska eksergija je komponenta od interesa. Sadržaj hemijske eksergije za smeše može se izračunati po [17]:

$$\dot{e}_{ch,mix} = \sum (\dot{e}_i \chi_i) + RT_0 \sum (\chi_i \ln a_i) \quad (5)$$

gde je: \dot{e} specifična eksergija (sadržaj po jedinici mase) komponente i , R molarna gasna konstanta, T_0 temperatura u referentnom stanju, χ molski ili maseni udeo i a je aktivnost komponente i u smeši. Ova jednačina se koristi za izračunavanje sadržaja eksergije metalnih legura i za proračun gubitka eksergije zbog promene u sastavu, kao posledice kontaminacije.

Tabela 1 - Specifični sadržaj hemijske eksergije nekih metala [14]

Material	\dot{e}_{ch} (MJ/kg)
Železo	0.88
Bakar (Skellefteå, Sweden)	990
Olovo	13
Cink	19
Aluminium	4.1
Platina	5800
Zlato	3,500,000

LCA-osnovne metode su razvijene za izračunavanje sadržaja eksergije nekoliko tipova materijala, kao što su rude i metali [14]. Tabela 1 prikazuje sadržaj eksergija nekih metala, koristeći referentno stanje koje su predložili Szargut i saradnici

[17]. Gubici kvaliteta tokom reciklaže mogu se opisati gubitkom eksergijskog sadržaja materijala. Zbog toga, smo proširili na ELCA metod koji je razvio Cornelissen [12] da bi se uključio opis gubitaka kvaliteta tokom procesa reciklaže.

3. MODEL ZA IZRAČUNAVANJE GUBITAKA EKSERGIJE TOKOM RECIKLAŽE

Za izračunavanje gubitaka eksergije tokom reciklaže, akcentat je stavljen na metalne legure jer su najrelevantniji materijali u putničkim vozilima iz perspektive životne sredine. U toku reciklaže metala javljaju se različite vrste gubitaka koje se mogu svrstati u, gubitke prerade, gubitke rastvaranja i gubitke razblaživanja.

3.1. Gubici kvaliteta u metalurškim procesima reciklaže

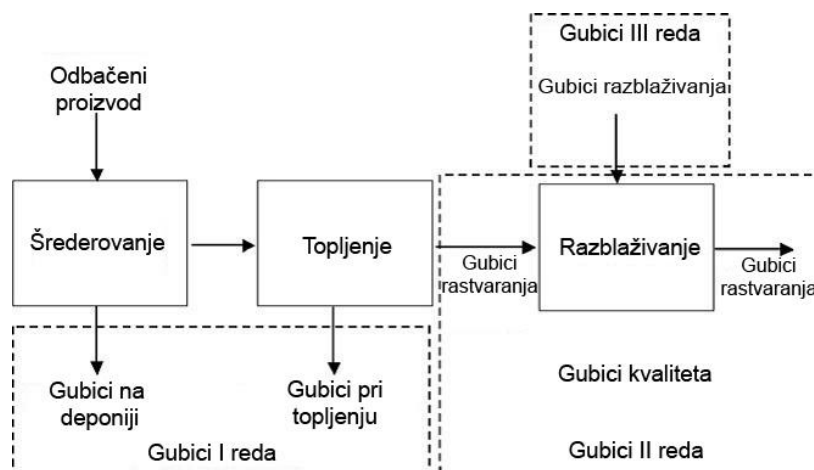
Gubici tokom metalurškog recikliranja metala mogu se svrstati u tri različita tipa: gubitke prvog, drugog i trećeg reda, šematski prikazanim na slici 2 [3]. Gubici prvog reda odgovaraju količini materijala koji se izgubi na deponiji nakon šrederovanja i odvajanja, i koji se izgubi u šljaci tokom topljenja. Gubici prvog reda dovode do smanjenja sadržaja eksergije u sistemu zbog gubitka materije. Ovi gubici mogu se direktno izračunati korišćenjem jednačine (5) množenjem specifičnih eksergija svake komponente u izgubljenom materijalu masom izgubljenog materijala.

Gubici drugog reda javljaju se tokom topljenja. Kada su kontaminanti (primese) prisutni, oni se rastvaraju u istopljenom metalu, povećavajući entropiju legure (tj. povećavajući neuređenost sistema). Ovo će u krajnjoj liniji dovesti do gubitka svojstava reciklirane legure, u odnosu na primarnu leguru, tako da su gubici drugog reda, gubici kvaliteta sistema. Gubitak drugog reda odgovara gubitku eksergije zbog povećanja neuređenosti sistema (a ne zbog gubitka mase). Gubici drugog reda se dešavaju u toku topljenja a potiču od dodavanja visoko čistih materijala za razblaživanje i mogu se izračunati prilagođavanjem jednačine (5) kao

$$\Delta \dot{E}_{ch,mix} = [\sum m_i (\dot{e}_i \chi_i) + RT_0 \sum m_i (\chi_i \ln a_i)]_{fin} - [\sum m_i (\dot{e}_i \chi_i) + RT_0 \sum m_i (\chi_i \ln a_i)]_{init} \quad (6)$$

gde je: m_i maseni udeo svake komponente, a $init$ i fin se odnose respektivno na stanje pre i posle operacije topljenja.

Gubici trećeg reda su zbog eventualne potrebe za razblaživanjem kontaminirajućih materija, kada one premaše maksimalni dozvoljeni sadržaj za određenu leguru. Dodatni resursi visoke čistoće moraju da se dodaju da bi se razblažile nečistoće na prihvatljiv nivo ili na prvobitni nivo. To dovodi do iscrpljivanja rezervi resursa i smanjuje efikasnost resursa sistema. Gubici trećeg reda mogu se direktno izračunati korišćenjem jednačine (5) množenjem specifičnih eksergija svake komponente materijala za razblaživanje masom potrebnog materijala za razblaživanje.

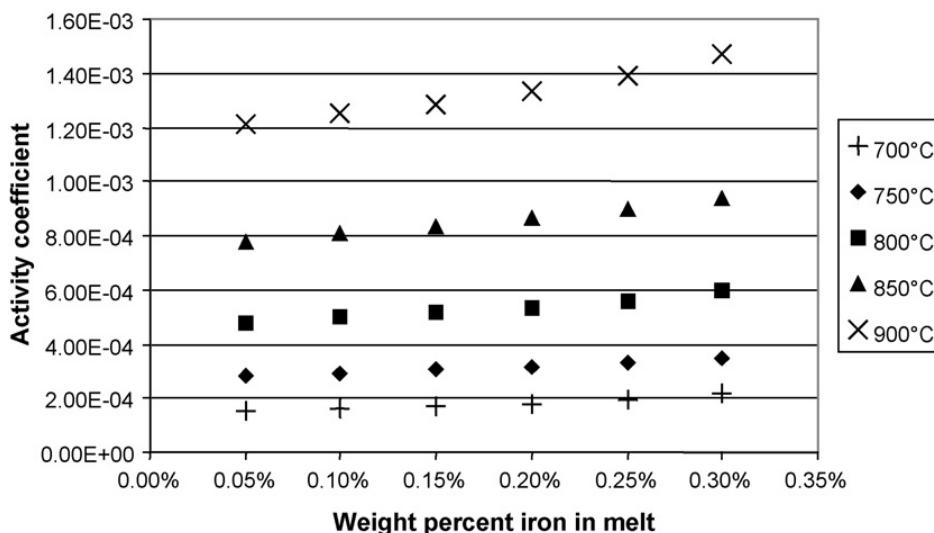


Slika 2 - Eksergijski gubici tokom recikliranja metalnih legura [3]

3.2. Ne-idealni rastvori i modeli rastvora

Materijali, a naročito legure metala, postoje bilo kao rastvori ili kao smeše odvojenih zrna, zavisno od toga kako jedinjenja reaguju jedna sa drugima u materijalu. Za idealne rastvore ili smeše zrna u čvrstom stanju, jedinjenja ne stupaju u interakciju i aktivnost može biti zamenjena molskim udelom. Ne-idealni rastvori su rastvori gde komponente stupaju u interakcije putem međusobno privlačnih ili odbijajnih sila. Stoga su količina rastvorene supstance i rastvarača koje su na raspolaganju da reaguju

različiti od iznosa koji bi se očekivali od njegove koncentracije u rastvoru. Aktivnost opisuje odstupanje od idealnog ponašanja i funkcija je sastava, temperature i pritiska. Ako se rastvarač ponaša veoma blizu idealnog, može se uzeti da aktivnosti imaju iste vrednosti kao molski udeli. Aktivnost metala u rastvorima se brzo smanjuje sa smanjenjem koncentracije metala. To otežava uklanjanje kontaminanata (primesa), kao što je prikazano na slici 3 Niska aktivnost smanjuje eksergiju rastvora, kao što je opisano jednačinom (5).



Slika 3 - Koeficijent aktivnosti železa u aluminijumu, u zavisnosti od sadržaja železa i temperature

Za izračunavanje aktivnosti komponenti ne-idealnih rastvora, mora biti poznato njihovo ponašanje u rastvoru. Aktivnost komponenti jako varira sa sastavom, pritiskom i temperaturom. Upotrebom modela rastvora, moguće je izračunati aktivnost višekomponentnih rastvora. Razvijeni su različiti modeli rastvora, u skladu sa ponašanjem komponenti u rastvoru [18]:

- Regularni model rastvora: supstitucijski rastvori;
- Podrešetkasti model rastvora: intersticijski rastvori, intermetalne faze i jonske tečnosti;
- Kvazihemijski model rastvora: ne-nasumično mešanje za izračunavanje aktivnosti kao funkcije sastava. Korišćen je Factsage softver sa bazom podataka rastvora SGTE [19]. Ovaj

softver proračunava termodinamičke osobine višekomponentnih rastvora, zasnovan uglavnom na regularnom modelu rastvora i podrešetkastom modelu rastvora, budući da ova dva modela najbolje opisuju ponašanje metalnih rastvora.

3.3. Mere efikasnosti resursa

U svim realnim sistemima, entropija se povećava uvek kada se dešava realni proces. Ovo izaziva smanjenje raspoložive eksergije u sistemu. Poželjna situacija je da su gubici eksergije što je moguće manji nakon svakog procesa.

Eksergijska efikasnost se izračunava pomoću jednačine (7), gde je odnos između zbira svih eksergijskih gubitaka podeljen zbirom svih eksergije dodatih sistemu [15]:

$$\Psi = \frac{\sum \Delta \dot{E}_{out}}{\sum \Delta \dot{E}_{in}} = \frac{(\dot{E}_{out} - \dot{E}_{loss})}{\dot{E}_{in}}, \text{ koje je uvek manje od 1} \quad (7)$$

gde je: \dot{E}_{in} zbir svih eksergijskih ulaska u sistem, \dot{E}_{out} zbir svih eksergija koje napuštaju sistem i \dot{E}_{loss} je izgubljena eksergija tokom analiziranog procesa.

Eksergijska efikasnost je uvek niža od jedinice u realnim procesima jer su oni rasipajući, kao što je navedeno u jednačini (7). Što je ovaj odnos bliži jedinici, veća je efikasnost sistema. Za izračunavanje efikasnosti resursa, obračunavaju se eksergijski sadržaji u svim ulaznim i izlaznim resursima koji su uključeni u proces. U primeru proračuna koji slede, gubici trećeg reda se takođe obračunavaju kao gubici. Iako gubici trećeg reda nisu gubici iz sistema (definisane granice sistema ne uključuju rezerve resursa, već samo količine materijala za reciklažu), može se tvrditi da je ovaj materijal "iscrpljen" iz resursnih rezervi i stoga se može smatrati kao reciklažni gubitak. Dakle, u primeru proračuna koji sledi, gubici trećeg reda će u jednačini (7) biti uključeni u terminu \dot{E}_{loss} .

Još jedna mera efikasnosti resursa korišćenja u životnom ciklusu proizvoda definiše se kao odnos ulaznih resursa, R.I. Ova mera računa odnos između ulaznih resursa potrebnih za razblaživanje

tokom reciklaže i ulaznog materijala koji se reciklira:

$$RI = \left(\frac{\dot{E}_{input}}{\dot{E}_{in}} \right) \quad (8)$$

Termin \dot{E}_{input} se odnosi na sadržaj eksergije resursa potrebnih za razblaživanje, odnosno na gubitke trećeg reda, a \dot{E}_{in} se odnosi na sadržaj eksergije početnog materijala koji treba da se reciklira. Niža vrednost R.I. ukazuje na bolju efikasnost procesa iskorišćenja resursa u proizvodima na kraju svog životnog ciklusa. Ako nema potrebe za razblaživanjem materijala, R.I. ima svoju minimalnu vrednost, nula.

3.4. Primer proračuna

Znajući količine oslobođenog i ne-oslobođenog materijala u otpadu za topljenje, maseni bilans nam omogućava izračunavanje sastava legure proizvedene topljenjem smeše oslobođenog i ne-oslobođenog metala. Factsage softver proračunava aktivnosti svih jedinjenja u rastvoru, znajući temperaturu, pritisak i masene udele. Sa podacima o aktivnosti i masenim udelima, može se izračunati ukupan eksergijski sadržaj legure korišćenjem jednačine (5), dok se gubici mogu izračunati korišćenjem jednačina (5) i (6). Da bi ilustrovali dejstvo kontaminacija (nečistoća), na eksergijski sadržaj recikliranih materijala, dat je primer proračuna uticaja železa, kao kontaminanta u toku dobijanja sekundarnog aluminijuma.

Pretpostavimo da otpad kovanog aluminijuma ima sledeći sastav: 181,5 kg aluminijumskog otpada sadrži 1,5 kg čelika kao kontaminacije tj. nečistoće. Aluminijum u otpadu je legura 2036. Tokom procesa regeneracije, procenjuje se da se izgubi 10% aluminijuma, tokom oporavka i razdvajanja (za pojednostavljenje primera, procenjuje se da je samo aluminijum izgubljen). Tako preostalih 163,5 kg aluminijumskog otpada sadrži 1,5 kg čelika (za pojednostavljenje primera, smatra se da je sastav čelika 100% Fe). Ovo ćemo zvati mešavina 1. Legura proizvedena topljenjem otpada zvaće se legura 2.

Tabela 2 - Količina i sastav različitih legura

Legura/mešavina		Masa (kg)	Hemijski sastav			
			Al	Cu	Fe	Si
Mešavina 1	Al 2036	162	0.969	0.026	0	0.005
	Fe	1.5	0	0	1	0
Legura 2	Melt	163.5	0.959	0.026	0.009	0.005
Razblažujuća legura	Al 2036	25.5	0.969	0.026	0	0.005
Legura 3	Al 380	189	0.961	0.026	0.008	0.005

Tabela 3 - Aktivnosti rastvorenih supstanci u tečnom aluminijumu dobijenih legura

Legura/ mešavina	Aktivnost rastvorene supstance (750°C, 1 atm)		
	Cu	Fe	Si
1	0.6662	-	1.203E-3
2	0.6662	3.382E-6	2.652E-5
3	0.6662	2.380E-6	2.666E-5

Sa "oporavljenim" materijalom, biće proizvedena legura livenog aluminijuma tip 380, zbog toga što je za ovu leguru dozvoljen viši sadržaj železa. Sastavi ove dve legure su:

- Al legura 2036 (kovana Al legura): Al 96,9%, Cu 2,6%, Si 0,5%.

- Al legura 380 (livena Al legura): Al 89,4%, Fe 0,8%, Mg 0,2%, 0,4% Mn, Si 8%.

Računajući da je dozvoljen limitirajući sadržaj železa - 0,8% - mora se dodati količina od 25,5 kilograma čistog kovanog aluminijuma 2036 da bi se razblažila kontaminacija železom. Legura proizvedena posle razblaživanja će se zvati legura 3. Podaci i sastav legura se mogu videti u tabeli 2.

Tipična temperatura topljenja aluminijuma je oko 750°C a pritisak je atmosferski. Unošenjem ovih podataka u Factsage softver, izračunata je aktivnost nekoliko elemenata. Aktivnosti su date u tabeli 3. Tabela 4 pokazuje specifičan sadržaj eksergije svake proizvedene legure, \dot{e}_{ch} , ukupan sadržaj eksergije, \dot{E} , i eksergijske gubitke prvog, drugog i trećeg reda.

Tabela 4 - Eksergijski sadržaj i eksergijski gubici usled kontaminacije železom

Materijal	\dot{e}_{ch} (MJ kg ⁻¹)	Masa (kg)	\dot{E}_{ch} (MJ)	\dot{E} Gubici (MJ)		
	(1)	(2)	(1)×(2)	1.-og reda	2.-og reda	3.-eg reda
Legura 1 (Al)	32.105	180	5778.9	577.9		
Mešavina 1 (Al)	32.105	162	5201			
Mešavina 1 (Fe)	6.7398	1,5	10.1			
Legura 2	32.074	163,5	5244.1		33.0	
Razbl. Leg. materijal 3	32.105	25,5	818.7			818.7
Legura 3	31.893	189	6027.8		34.9	

Gubici prvog reda odgovaraju gubitku od 10% legure 2036 tokom postupka reciklaže. Eksergijski gubici drugog reda odgovaraju smanjenju specifične eksergije (\dot{e}_{ch}) zbog rastvaranja kontaminirajućih materija, što čini ukupno 67,9 MJ. Gubici trećeg reda odgovaraju iznosu dodate eksergije u sistemu kao razblažujućeg materijala. Iz tabele 4, je vidljivo da se specifični eksergijski sadržaj, \dot{e}_{ch} , smanjuje od legure 1 do legure 3, dakle materijal gubi kvalitet u toku procesa topljenja i razblaživanja.

Konačno, vrednost efikasnosti resursa je izračunata za topljenje i razblaživanje, gde je \dot{E}_{in} zbir eksergija sadržanih u leguri 1 i leguri za razblaživanje, \dot{E}_{out} eksergijski sadržaj legure 3 i \dot{E}_{loss} je zbir svih gubitaka. Izračunata efikasnost resursa je $\psi = 0,88$. Dobijeni odnos ulaznih resursa za ovaj primer je R.I. = 0,16.

Kao pokazatelj kako kontaminacija može postati veliki problem, je primer da ako se sekundarna legura 2036 treba proizvesti iz kontaminiranog otpada, koja ima maksimalni sadržaj gvožđa od 0,3%, potreban razblažujući materijal bi bio 337 kg nekontaminirane legure 2036, ili alternativno 327 kg čistog aluminijuma (99,9%). To je razlog zašto u industrijskoj praksi reciklери imaju relativno velike zalihe otpada sa različitim sastavima koje onda mešaju, da bi se izbegla potreba za razblaživanjem

materijalima visoke čistoće tokom proizvodnje recikliranih legura.

Pored toga, mora se pomenuti da navedenim proračunom nisu obuhvaćeni svi gubici. Za proizvodnju legure 380 zahtevanog sastava, dodatne količine silicijuma, magnezijuma i mangana moraju da se dodaju u rastopljeni metala, što time dovodi i do dodatnih gubitaka eksergije, a izvesna kontaminacija bakrom ostaje, budući da bakar ne može da se ukloni iz istopljenog aluminijuma tekućim industrijskim procesima.

4. ZAKLJUČAK

Metod predstavljen u ovom radu omogućava izračunavanje eksergijskih gubitaka metala koji nastaju usled reciklažne kontaminacije. Gubitak sadržaja specifične hemijske eksergije metalnih tokova, može se koristiti kao mera za opisivanje gubitka kvaliteta metala tokom reciklaže i za izračunavanje efikasnosti resursa sistema. Gubici kvaliteta se javljaju usled ne-idealnog ponašanja metalnih rastvora, kao što pokazuju predstavljene vrednosti aktivnosti. Rezultati proračunatog primera pokazuju da se specifični sadržaj eksergije, \dot{e}_{ch} , smanjuje tokom nekoliko koraka reciklaže, a samim tim i materijali gube kvalitet tokom procesa topljenja i razblaživanja.

Gubici drugog reda su relativno mali, u odnosu na ukupan sadržaj eksergije sistema. Najveći gubici su gubici prvog i trećeg reda, zbog odnosa u materijalnim gubicima tokom procesa regeneracije i potrebe za uvođenjem materijala za razblaživanje u sistem. Iako gubici trećeg reda nisu realni resursni gubici, pošto materija ostaje u sistemu, materijal za razblaživanje mora biti uklonjen iz resursnih rezervi, kao posledica kontaminacije. Stoga se može tvrditi da su ovi resursi iscrpljeni, smanjujući na taj način održivost korišćenja resursa. Gubici trećeg reda su odgovorni za nisku eksergijsku efikasnost regeneracije i reciklažu metala u pogledu R.I., tj. odnosa ulaznih resursa.

Iako obračun gubitaka eksergije tokom reciklaže može postati kompleksan usled raznovrsnosti materijala koji su uključeni i puno mogućnosti da se proizvedu reciklirane legure mešanjem otpada i razblažujući kontaminante, kada su sastav i uslovi topljenja poznati, sadržaj eksergije i gubici mogu se koristiti kao mera efikasnosti resursa regeneracije i reciklaže, posebno što se tiče izbegavanja nepovratne kontaminacije i potrebe za razblaživanjem materijala tokom recikliranja. Obračun gubitaka eksergije se stoga proširuje na analizu kvaliteta resursnih tokova, i zbog toga je veoma dragocen.

Uzimajući u obzir sve navedeno, možemo zaključiti da se javljaju dve posledice kontaminacije resursa i to:

- smanjenje sadržaja eksergije resursa i
- proizvodnja resursa nižeg kvaliteta iz resursnih zaliha višeg kvaliteta (kao posledica razblaživanja).

Prikazani rezultati u ovom radu pokazuju da se materijalima mora obazrivo upravljati da bi se resursi optimalno koristili, a da se čak ni metali ne mogu u potpunosti reciklirati, bez obzira na situaciju. Ako su nivoi kontaminacije (zaprljanja) veći nego što je prihvatljivo, razblaživanje materijala je od suštinskog značaja da bi se kvalitet vratio na standardne vrednosti. Ovo naravno treba izbegavati, ako imamo za cilj održivu upotrebu resursa.

Zahvalnica

Rezultati prikazani u radu predstavljaju deo istraživanja na projektima TR34023 i TR34002 čiju realizaciju finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Castro M.B., Remmerswaal J.A.M., Brezet J.C., van Schaik A., Reuter M.A. (2005) A simulation model for the comminution-liberation of recycling streams: relationships between product design and the liberation of materials during recycling, *Int J Min Proc*, 75, 3/4, 255–281.
- [2] Castro M.B.G., Remmerswaal J.A.M., Reuter M.A., Boin U.J.M. (2004) A thermodynamic approach to the compatibility of materials combinations for recycling, *Resour Conserv Recycl*, 43, 1, 1–19.
- [3] Castro M.B.G., Remmerswaal J.A.M., Brezet J.C., Reuter M.A. (2007) Exergy losses during recycling and the resource efficiency of product systems, *Resour Conserv Recycl*, 52, 2, 219–233.
- [4] Aoki I. (1998) Entropy and exergy in the development of living systems: a case-study of lake ecosystems, *J Phys Soc Jpn*, 67, 6, 2132–2139.
- [5] Ayres R.U., Ayres L.W., Martínás K. (1998) Exergy, waste accounting and life cycle analysis, *Energy*, 23, 5, 355–363.
- [6] Caton J.A. (2000) On the destruction of availability (exergy) due to combustion processes — with specific application to internal-combustion engines, *Energy*, 25, 11, 1097–1117.
- [7] Dewulf H., van Langenhove H. (2003) Exergetic material input per unit of service (EMIPS) for the assessment of resource productivity of transport commodities, *Resour Conserv Recycl*, 38, 2, 161–174.
- [8] Schneider E.D., Kay J.J. (1994) Complexity and thermodynamics: Towards a new ecology, *Futures*, 26, 6, 626–647.
- [9] Sorin M., Hammache A., Diallo O. (2000) Exergy based approach for process synthesis, *Energy*, 25, 2, 105–129.
- [10] van Schijndel P.P.A.J., Janssen F.J.J.G., Mrema G., Greeff I.L., Exergy Analysis and Environmental Impact Assessment of Cement Production: Tanzanian and South African Case Studies. Paper presented to the Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulations and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS, 2000), Twente, Netherlands, July, 2000, 1425-1436.
- [11] Wall G. (1987) Exergy conversion in the Swedish society, *Resour Energy*, 9, 1, 55–73.
- [12] Cornelissen R.L., Thermodynamics and sustainable development—the use of exergy analysis and the reduction of irreversibility, Ph.D. Thesis., University of Twente, The Netherlands, 1997.
- [13] NOVEM, 2000. Studie naar de meerwaarde van exergiegerichte levenscyclusanalyse (ELCA) ten opzichte van levenscyclusanalyse (LCA). Rapport 2EWAB00.32, October 2000, Utrecht, The Netherlands.
- [14] Finnveden G. and Östlund P. (1997) Exergies of natural resources in life-cycle assessment and other applications, *Energy*, 22, 9, 923–931.
- [15] Kotas T.J., The exergy method of thermal plant analysis, 2nd ed., Krieger Publishing Company, (1995) USA.
- [16] Rosen M.A., Dincer I. (1997) On exergy and environmental impact, *Int J Energy Res*, 21, 7, 643–654.
- [17] Szargut J., Morris D.R., Steward F.R., Exergy analysis of thermal chemical and metallurgical processes, Hemisphere Publishing Corporation, (1988) New York.
- [18] Sano N., Lu W.K., Riboud P.V., Maeda M., Advanced physical chemistry for process metallurgy, Academic Press, (1997) San Diego, Calif.
- [19] Factsage, (2001) <http://www.factsage.com>. Factsage™ Software homepage.

ABSTRACT

APPLICATION OF EXERGY ANALYSIS IN RECYCLING STREAMS

Materials for recycling always contain a certain degree of contamination. The presence of impurities i.e. contamination in the recycling streams causes a change in the composition of the original materials to recycle. As a result, the quality of materials can be reduced in each successive step of recycling. In addition, the resources of lower quality are produced from the resource flows which had a higher quality in their original form. This kind losses of quality cannot be measured by mass balance, as well as the quality degradation not only can display measurements of mass. For the calculation of all losses caused by recycling contaminations, all further recycling processes required to return the materials back into resource cycles must be included. The method for calculating the exergy content and exergy losses of metal solutions during recovery and recycling is presented in this paper. The losses attributed to recycling, namely the material losses, the contamination losses with other metals, and the consequent need for dilution can be used as indicators of the quality loss of materials and of the efficiency of resource use in product systems. Therefore, exergy is proposed here as a measure of the efficiency of resources use. This paper presents calculations of exergy losses during recycling shown in the case of aluminum waste.

Keywords: *exergy, losses; recycling contamination; quality degradation, resource efficiency.*

Scientific paper

Paper received: 10. 02. 2015.

Paper accepted: 28. 03. 2015.