

ALEKSANDRA M. MITOVSKI
DRAGANA T. ŽIVKOVIĆ
LJUBIŠA T. BALANOVIĆ
NADA D. ŠTRBAC
ŽIVAN D. ŽIVKOVIĆ

Univerzitet u Beogradu, Tehnički
fakultet, Bor

STRUČNI RAD

UDK 669.6:669.017.16:621.792:502/504

DOI: 10.2298/HEMIND0903163M

ANALIZA ŽIVOTNOG CIKLUSA BEZOLOVNIH LEMNIIH LEGURA SA ASPEKTA ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE*

Metoda analize životnog ciklusa (LCA – Life Cycle Assessment) koristi se za ocenjivanje mogućih uticaja određenog materijala na životnu sredinu u različitim stadijumima razvoja materijala. U radu je dat pregled dosadašnjih istraživanja analize životnog ciklusa bezolovnih lemnih legura, i to Sn–Cu, SAC (Sn–Ag–Cu), BSA (Bi–Sb–Ag) i SABC (Sn–Ag–Bi–Cu) sa aspekta zaštite životne sredine – polazeći od proizvodnje legura, preko primene, do kraja njihovog »životnog« veka, tj. reciklaže. Analiza je vršena komparativno, u odnosu na analizu do sada standardno korišćenog Sn–Pb lema. U radu se dodatno razmatraju i uticaji potrošnje materijala, korišćenja energije, rezervi vode i vazduha, toksičnosti po ljudsko zdravlje i okolinu, kao i mogućnosti rastvaranja i reciklaže.

Eutektičke kalajno-olovne (SnPb) legure dugo su predstavljale jedini izbor lemova za primenu u elektronici zbog njihovih osobina – niske tačke topljenja, relativne duktilnosti na sastavu lema, itd. Međutim, obzirom na visoku toksičnost olova po ljudsko zdravlje i okolinu, kao i zbog pritiska zakonske regulative, elektronska industrija je počela da se okreće bezolovnim lemnim legurama. Iako su proučavane brojne varijante bezolovnih lemova, uticaji njihovih životnih ciklusa na okolinu još nisu procenjeni.

Analiza životnog ciklusa, kao jedan od relativno novijih pristupa proučavanju lemnih legura, nudi mogućnosti ublažavanja sadašnjih i budućih rizika u elektronskoj industriji time što pomaže u otkrivanju manje toksičnih bezolovnih lemnih legura čime smanjuje rizike tokom njihovog životnog ciklusa. Pored toga, ova analiza obezbeđuje elektronskoj industriji neophodne podatke koji se primenjuju kada se uvode inovacije, kao što su unapređenje proizvoda, procesa, korišćenja sirovog materijala, procesne tehnike, potrošnje i upravljanja otpadom.

Analiza životnog ciklusa (Life cycle analysis–LCA)

Analiza životnog ciklusa (u daljem tekstu: LCA) procenjuje različite uticaje životnog ciklusa materijala ili proizvoda na ekologiju sa pet glavnih stanovišta, i to: ekstrakcija – dobijanje sirovih materijala, prerada do finalnog proizvoda, primena proizvoda, i konačno povlačenje proizvoda iz upotrebe, na kraju njegovog životnog ciklusa.

Primenjena u ovom istraživanju, analiza je uključila odabrane lemne legure bazirane na olovu, kao i bezolovne lemne legure, pružajući mogućnost za jasno sagledavanje ekoloških posledica proizvodnog sistema u toku njegovog radnog veka. LCA nalazi značajnu pri-

menu u industriji, i sadrži četiri osnovna koraka definisana od strane Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), a u skorije vreme i od strane International Standards Organization (ISO):

1. *Definisanje ciljeva i monitoring* obeležava racionalizaciju za sprovođenje LCA u njegovoj osnovnoj nameri, kao i pri specifikaciji proizvodnih sistema i kategorija podataka koje će se proučavati.

2. *Popis životnog ciklusa* (LCI–Life cycle inventory) uključuje kvantifikaciju sirovih materijala i energetskih inputa, kao i emisije čvrstih, tečnih i gasovitih otpadnih materija.

3. *Procena uticaja životnog ciklusa* (LCIA–Life cycle impact assessment) karakteriše ekološke imperativne definisane u okviru popisa životnog ciklusa i pretpostavlja njihove efekte na ekologiju, ljudsko zdravlje i druge abiotičke efekte, kao što su stvaranje smoga i globalno zagrevanje.

4. *Procena poboljšanja ili prikaz rezultata* koriste podatke dobijene analizom kako bi se otkrile i procenile mogućnosti smanjenja uticaja životnog ciklusa proizvoda, procesa ili aktivnosti na ekologiju, ili pak doneli zaključci na osnovu kojih se formiraju preporuke za dalje delovanje.

Tabela 1 detaljno opisuje svaku od navedenih faza proizvodnje lemnih legura. U okviru svake od faza životnog ciklusa, procenjuju se protok materijalnih i energetskih inputa, emisije gasova i otpada, zatim protok outputa, kao i međusobne veze između faza (transport), u cilju utvrđivanja ekoloških uticaja. U prezentaciji rezultata kombinuje se ekstrakcija sirovih materijala i prerada u jednu povratnu fazu životnog ciklusa.

Izbor legura

Legure za analizu (tabela 2) odabrane su na osnovu različitih karakteristika, kao što su trenutni tržišni trendovi i postojeće studije o karakteristikama lemnih legura – sve legure su bile dostupne za primenu u elektronskoj industriji. Eutektički kalajno-olovni (SnPb) lem, jedini iz spektra lemova na bazi olova koji je bio is-

*Rad saopšten na skupu „Sedmi seminar mladih istraživača“, Beograd, 22–24. decembar 2008.

Autor za prepisku: A. M. Mitovski, Tehnički fakultet, Vojske Jugoslavije 12, 19210 Bor.

E-pošta: amitovski@tf.bor.ac.rs

Rad primljen: 22. decembar 2008.

Rad prihvaćen: 21. januar 2009.

Tabela 1. Faze životnog ciklusa alternativnih lemnih legura
Table 1. Life-cycle stages for solder alternatives

Ulaz	Faze životnog ciklusa	Izlaz
	<i>Ekstrakcija/Dobijanje sirovine</i> Procesi vezani za dobijanje iz prirodnih izvora, iskopavanje neobnovljivih materijala, sakupljanje biomase i transport sirovine na pripremu.	
	<i>Priprema materijala</i> Priprema putem hem. reakcije, separacije, prečišćavanja i drugih koraka koji transformišu materijal u stanje pogodno za preradu; i transport pripremljenog materijala do pogona na dalje procesiranje.	
→ Sirovine	<i>Dobijanje proizvoda</i> Prevođenje materijala u lemове i lemne alternative.	
	<i>Primena proizvoda</i> Primena lemova na elektronskim sklopovima, koje se zatim implementiraju u različite elektronske proizvode.	→ Otpad
→ Energija	<i>Odlaganje otpada (na kraju životnog ciklusa)</i> Na kraju životnog ciklusa, , povlače se iz upotrebe. Ukoliko je reciklaža legura izvodljiva, stara legura se pretapa i procesuiru do ponovo upotrebljivog proizvoda.	
→ Izvori	Neobnovljivi materijali transportuju se do odgovarajućeg postrojenja za neutralisanje ili uništavanje.	→ Proizvodi

traživan, uzet je kao osnova za wave* i reflow** lemljenje. Kalajno-bakarna legura (SnCu) odabrana je zbog toga što se u današnje vreme koristi u elektronskoj industriji kao jeftina zamena za SnPb lemne legure u lemovima dobijenim talasnim lemljenjem. Lemne legure na bazi Sn–Ag–Cu sistema (SAC) izabrane su zbog podjednako dobrih karakteristika lemova dobijenih kako talasnim postupkom tako i reflow lemljenjem. Takođe, ova kombinacija lemnog materijala pokazala se kao najbolja zamena SnPb lemovima. U ispitivanu grupu lemova ušle su još i dve legure na bazi bizmuta – BiSnAg i SnAgBiCu (SABC), radi proučavanja njihovog uticaja na ekologiju, posebno na kraju životnog ciklusa legure jer se ove legure takođe razmatraju kao alternativna zamena legurama na bazi olova.

Tabela 2. Karakteristike legura odabranih za LCA
Table 2. Solder properties selected for LCA

Lemne legure	Sastav, %	Gustina g/cm ³	t _{top} / °C
SnPb – standardna	63 Sn/37 Pb	8,4	183
SnCu	99,2 Sn/0,8 Cu	7,3	227
SnAgCu – SAC	95,5 Sn/3,9 Ag/ /0,6 Cu	7,35	218
BiSnCu – BSA	57,0 Bi/42,0 Sn/ /1,0 Ag	8,56	138
SnAhBiCu – SABC	96,0 Sn/2,5 Ag/ /1,0 Bi/0,5 Cu	7,38	2115

*Proces nanošenja lemnog materijala «u talasima» radi spajanja metalnih delova u integralno kolo elektronskih sklopova.

**Proces nanošenja lemne legure u obliku paste na materijal koji se spaja, a koji se zatim zagreva radi očvršćavanja lema.

METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

U okviru LCA, proizvodni sistem se procenjuje na osnovu funkcionalnosti ekvivalenta. Takozvana »funkcionalna jedinica« definiše se kao jedinica zapremine lemne legure neophodna da drži spoj i usklađuje podatke bazirane na potrošnji ekvivalenta kako bi se obezbedili podaci za popis ulaza i izlaza i izvršila procena svih alternativnih ekvivalenata. Sledstveno tome, odabrana je zapremina od 1000 cm³ lemnog materijala kao funkcionalna jedinica za LCA.

Dve faze kod LCA – popis životnog ciklusa (LCI) i procena uticaja životnog ciklusa (LCIA) neophodne su za proračun ekoloških uticaja.

Popis životnog ciklusa (LCI) uključuje određivanje i kvantifikaciju ulaznih materijala, kao i emisiju i izlaz analiziranih proizvoda. Ulazni materijali podrazumevaju sirovinu, energiju i druge izvore koji se koriste tokom životnog ciklusa lemnih legura. U izlazne proizvode spadaju gotovi proizvodi, emisija gasova i vode u zemljište.

Procena uticaja životnog ciklusa (LCIA) jeste proces gde se identifikovana ekološka opterećenja u LCI prevode u ekološke uticaje. Važno je napomenuti da se direktno poređenje kroz kategorije uticaja ne može izvršiti zato što se uticaji u različitim kategorijama izračunavaju na osnovu drugačijih skala. Proces procene uticaja životnog ciklusa uključuje dva koraka: klasifikaciju i karakterizaciju.

Metodologija LCIA primenjena u ovoj analizi svaki uticaj ulaznih i izlaznih materija svrstava u 16 različitih kategorija, podeljenih u dve podkategorije (tabela 3):

– *uticaji prirodnih resursa* (osiromašenje neobnovljivih resursa, primena obnovljivih resursa, potrošnja energije i korišćenje zemljišta) i

– *uticaji abiotičkog ekosistema* (globalno zagrevanje, postojanje ozonske rupe i efekta «staklene bašte», acidifikacija, fotohemijski smog, prisustvo čestica u vazduhu, difuzno zagađenje i kvalitet vode, kancerogeni i nekancerogeni uticaji na ljudsko zdravlje, vodena ekotoksičnost).

S obzirom na veliku količinu podataka uključenih u nabranje svih ulaza i izlaza, primenjena su određena pravila odlučivanja kako bi se odredilo koji od njih ula-

ze u sastav LCI. Pravila odlučivanja definisana su tako da se svim podacima može lako upravljati, a da oni pri tom dobro reprezentuju proizvode i njihove uticaje na životnu sredinu. Na primer, materijalni inputi u glavnim procesima, uključeni u LCA analizu, treba da prate jedan ili više sledećih kriterijuma:

– sadrži više od 1% od ukupne mase ili energije neophodne za proizvodnju lemne legure,

– sadržaj materijala koji se ispituje je 1–5% zavisno od kriterijuma odlučivanja, kao i dostupnosti podataka,

– poznato je ili se pretpostavlja da ima uticaja na

Tabela 3. Kategorije uticaja
Table 3. Impact categories

Kategorija uticaja	Input	Output	Opis
Uticaji prirodnih resursa			
Osiromašenje neobnovljivih izvora	Sirovina, gorivo	–	Sirovine-metali ili fosilna goriva, koji se ne obnavljaju prirodnim putem.
Primena obnovljivih izvora	Sirovina, voda	–	Sirovine koje se nalaze u prirodi i dopunjavaju se putem prirodnih procesa.
Potrošnja energije	El. energija, gorivo	–	Količina utrošene energije. Uticaji povezani sa energijom uključeni su u druge kategorije uticaja.
Korišćenje zemljišta	–	Čvrst, radioaktivni otpad; u zemljište	Površina zemljišta neophodna za odlaganje čvrstog/opasanog/ radioaktivnog otpada.
Uticaji abiotičkog ekosistema			
Globalno zagrevanje	–	Vazduh	Količina emitovanih gasova koji stvaraju efekat staklene bašte (u odnosu na CO ₂)
Postojanje ozonske rupe	–	Vazduh	Količina emitovanih materija koje izazivaju stratosfersko osiromašenje ozonom (u odnosu na trihlorfluorometan, CFC-11)
Fotohemijski smog	–	Vazduh	Količina hemikalija koje izazivaju stvaranje smoga (u odnosu na eten, C ₂ H ₄)
Acidifikacija	–	Vazduh	Količina emitovanih oksidujućih supstanci (u odnosu na SO ₂)
Prisustvo čvrstih čestica u vazduhu	–	Vazduh	Masa emitovanih čvrstih čestica sa prečnikom manjim od 10µm
Difuzno zagađenje vode	–	Voda	Masa ispuštenih hemikalija koje izazivaju difuzno zagađenje vode (u odnosu na fosfate)
Kvalitet vode	–	Voda	Količina BOD ^a i TSS ^b
Ljudsko zdravlje i ekotoksičnost			
Hronični, nekancerogeni uticaji na ljudsko zdravlje-profesionalne bolesti	Material	–	Iznosi nekancerogenih ispuštenih materija bazirani na njihovoj količini i toksičnosti koji utiču na zdravlje radnika
Karcinogeni uticaji na ljudsko zdravlje-profesionalne bolesti	Material	–	Iznosi kancerogenih ispuštenih materija bazirani na njihovoj količini i toksičnosti koji utiču na zdravlje radnika
Hronični, nekancerogeni uticaji na javno zdravlje	–	Vazduh, zemlja, voda	Iznosi nekancerogenih ispuštenih materija bazirani na njihovoj količini i toksičnosti koji utiču na javno zdravlje
Karcinogeni uticaji na javno zdravlje	–	Vazduh, zemlja, voda	Iznosi kancerogenih ispuštenih materija bazirani na njihovoj količini i toksičnosti koji utiču na javno zdravlje
Vodena ekotoksičnost	–	Voda	Iznosi ispuštenih materija u vodu koji utiču na zdravlje riba

^aBiochemical oxygen demand; ^bTechnical standards & safety authority

ekološke faktore,

- poznato je ili se pretpostavlja da ima značajne energetske zahteve,

- jedinstven je kao alternativa osnovnim SnPb lemovima ili

- funkcionalno je značajan kao komponenta lemnog materijala.

REZULTATI I DISKUSIJA

Poređenje uticaja lemnih legura na ekologiju i ljudsko zdravlje

Primena analize životnog ciklusa na ispitivane olovne lemne legure i njihove bezolovne alternative prema gore navedenoj LCI i LCIA metodologiji [1–5] je publikovana u literaturi [6–25], na osnovu čega se došlo do sledećih rezultata.

Među svim ispitivanim legurama:

- SnPb ima najveće pokazatelje u šest kategorija uticaja,

- SAC ima najveće pokazatelje u deset kategorija uticaja,

- SnPb ima najniže vrednosti u pet kategorija uticaja i

- BSA ima najniže vrednosti u sedam kategorija uticaja.

Među ispitivanim bezolovnim lemovima:

- BSA ima najniže vrednosti uticaja životnog ciklusa u svim kategorijama izuzev u kategoriji korišćenja neobnovljivih izvora,

- SAC ima najveće vrednosti u svim kategorijama izuzev u kategoriji zagađenosti vodenih ekosistema i kancerogenih bolesti i

- SABC poseduje najviše vrednosti u oblasti kancerogenih bolesti i toksičnosti vodenih ekosistema i najniže vrednosti u kategoriji neobnovljivih izvora.

Treba napomenuti da navedeni faktori uticaja pokazuju samo relativne razlike među lemnim legurama.

Uticaji prirodnih resursa

Upotreba neobnovljivih izvora. Neobnovljivi izvori su tipični predstavnici abiotičkih materijala, kao što su mineralna ili fosilna goriva. Potrošnja električne energije po jedinici proizvoda najveća je kod SnPb lemne legure zbog njene veće relativne gustine. BSA troši manje energije u odnosu na druge lemne, zbog svoje niže temperature topljenja (bez obzira na gustinu). SAC i SABC imaju zbirno veće uticaje u ovoj kategoriji zbog svoje velike primene u proizvodnji srebra.

Upotreba obnovljivih izvora. Obnovljivi izvori su tipični biotički materijali, kao što su šume ili životinjski proizvodi, biljke i voda. SnPb poseduje najveće vrednosti pokazatelja u ovoj kategoriji, jer troši najviše električne energije po jedinici proizvoda zbog svoje relativno visoke gustine. BSA ima najniže pokazatelje kate-

gorije uticaja, jer troši manje električne energije u odnosu na druge lemne legure zbog svoje niske temperature topljenja (bez obzira na vrednost gustine).

Korišćenje energije. Pokazatelji uticaja korišćenja energije predstavljaju zbir ulaza električne energije i energije sagorevanja goriva. SAC poseduju najveće vrednosti zbog velike potrošnje energije tokom procesa izdvajanja i prerade srebra. Uticaj energije iz prerade srebra približava se vrednosti proizvodnje kalaja, čak i kada je sadržaj srebra (3,9%) od SAC značajno niži od sadržaja kalaja (95,5%). Uticaj potrošnje energije kod BSA lemnih legura je relativno niži u odnosu na druge lemne legure zbog niže temperature topljenja.

Korišćenje zemljišta za deponije. Uticaji korišćenja zemljišta za deponije proračunati su na osnovu veličine prostora na kojem se smeštaju čvrst, opasan i/ili radioaktivni otpad. SnPb u ovom slučaju pokazuje najniže vrednosti kategorije uticaja, dok SAC legure imaju najveće pokazatelje. Proizvodnja srebra, posebno proces izdvajanja šljake odgovoran je za najveći uticaj ove kategorije uticaja za sve bezolovne lemne legure.

Uticaji abiotičkih ekosistema

Globalno zagrevanje. Uticajni pokazatelji efekata globalnog zagrevanja i klimatskih promena proračunati su korišćenjem globalne količine gasa koji se ispušta u atmosferu izmenjenim za faktor ekvivalencije zagrevanja. Uticaj globalnog zagrevanja sledi trend posmatran za kategoriju potrošnje energije i od koga se očekuje da proizvodnja električne energije doprinosi značajnom oslobađanju CO₂ gasa koji najviše utiče na globalno zagrevanje. BSA ima u osnovi niže vrednosti u ovoj kategoriji zbog niske temperature topljenja, koja smanjuje potrošnju energije tokom reflow procesa. SAC ima veće vrednosti u ovoj kategoriji.

Stratosfersko osiromašenje ozona. Uticajni pokazatelji osiromašenja ozona bazirani su na identifikaciji i utvrđivanju količine hemijskih materija koje se ispuštaju u atmosferu i utiču na smanjenje količine ozona. SAC legure imaju najviše vrednosti u ovoj kategoriji uticaja, dok je najniža vrednost zapažena kod BSA legura.

Fotohemijski smog. Fotohemijski smog se odnosi na ispuštanje u atmosferu hemikalija koje sa sunčevom svetlošću reaguju i stvaraju fotohemijske oksidanse, kao troposferni ozon. Faze proizvodnje i primene zajedno doprinose značajnom uticaju kategorije fotohemijskog smoga za bezolovne lemne, gde faza primene utiče sa više od 93% od uticaja SnPb smoga.

Acidifikacija. Uticaji acidifikacije (okiseljavanja) odnose se na ispuštanje hemikalija koje mogu doprineti obrazovanju kiselih precipitata. SAC imaju najviše vrednosti pokazatelja u ovoj kategoriji, SnPb imaju najniže pokazatelje. Sumpor(IV)-oksid i oksidi azota su glavni faktori koji utiču na acidifikaciju.

Čestice u vazduhu. Uticaj čestica/prašine u vazduhu zasnovan je na količini čestica, tj. njihovoj veličini

(prečnik čestice koja se ispušta u atmosferu manji od 10 μm). SnPb ima najniže pokazatelje u ovoj kategoriji, SAC ima najveće vrednosti. Približno 79% uticaja čestica u vazduhu na životni ciklus SbpPb legure uslovljen je fazom primene legure.

Zagađenost vode. Uticaji zagađenja vode baziraju se na vrsti i koncentraciji otpadnih supstanci koje se ispuštaju u vodotokove nakon upotrebe. Faza primene kod svih lemova utiče sa 95 do 97% na ukupno zagađivanje vode. Od toga najveći uticaj ima hemijski kiseonik iz proizvodnje električne energije. SnPb ima najviše vrednosti u ovoj kategoriji uticaja, iako se podaci za SAC i SABC legure mogu i značajno razlikovati. BSA manje utiče na zagađenje vode od drugih legura jer on zahteva manje količine energije tokom primene.

Kvalitet vode. Uticaj kvaliteta vode karakteriše se količinom biološkog kiseonika i ukupnom količinom čvrstih materija u otpadnim vodama koje se ispuštaju u prirodne vodotokove. SAC legure imaju najveći uticaj u ovoj kategoriji, dok BSA imaju najniže pokazatelje.

Ljudsko zdravlje i ekotoksičnost

Nekancerogene bolesti. Uticajni faktori na zdravlje bazirani su na potencijalnoj toksičnosti materijalnih inputa svakog procesa. Nekancerogeni uticaji SnPb, SAC i SABC u značajnoj meri zavise od procesa proizvodnje lemni legura. Toksičnost olova je veoma visoka u odnosu na druge metale, koji, u kombinaciji sa relativno velikim sadržajem olova u ulaznim sirovinama, rezultuju većim vrednostima nekancerogenih uticaja u odnosu na bezolovne lemne legure. Uticaji SnPb su 69 do 239 puta veći od uticaj drugih legura. Srebro ima najveće vrednosti nekancerogene toksičnosti kod bezolovnih lemova. Kod BSA lemni legura uticajni pokazatelji u ovoj kategoriji imaju najniže vrednosti kao posledice manjeg učešća srebra u bezolovnim lemni legurama.

Kancerogene bolesti. Prirodni gas koji se koristi za dobijanje električne energije u reflow procesu najveći je uticajni faktor u ovoj kategoriji za sve lemove. SnPb ima najveće vrednosti uticajnih faktora, ali ne mnogo veće od SABC i SAC legura. BSA ima najniže vrednosti uticajnih faktora, zbog manje količine električne energije koja se koristi za proizvodnju jedinice proizvoda BSA lemne legure. Visoke vrednosti uticajnih faktora prirodnog gasa primarno su vezane za relativno velike količine prirodnog gasa koji je vezan za procese dobijanja legura, a ne zbog kancerogenosti.

Vodena ekotoksičnost. Industrijske otpadne vode u velikoj meri su zagađene metalima: olovom, cinkom, kadmijumom, cijanidima koji dalje zagađuju okolno zemljište, što posredno predstavlja ozbiljan problem po ljudsko zdravlje i ekologiju [26]. Uticaji vodene ekotoksičnosti odnose se na hemijske materije koje se ispuštaju u vodotokove i time utiču na život biljaka i životinja. SnPb ima najveće pokazatelje, dok BSA legure imaju najniže vrednosti. Prema EOL, 99,9% uticaja na ekotok-

sičnost ima SnPb, 70% BSA, 65% SABC i 45% SAC. Visoka vrednost uticaja SnPb posledica je apsorpcije olova u vodi, koje se pre toga odlaze na deponijama.

Mogućnosti smanjenja uticaja na ljudsko zdravlje i ekologiju

Sastav lemni legura ima opseg od potpuno čistih metala do 80% mešavine nekih lemni legura na bazi Sn i Pb, do najviše 100% recikliranog sadržaja za srebro, zavisno od proizvođača i vrste legure. Bizmut se trenutno ne reciklira, zbog visoke cene reciklaže. Stoga se bizmut u lemni legurama koristi kao čist materijal. Recikliranje posle upotrebnog veka metala podrazumeva vraćanje otpadnog metala iz elektronskih proizvoda u proces prerade i rafinacije do osnovnog metala. Zbog toga što se procesni otpad u najvećoj meri sastoji od otpadnih komponenti lemni materijala, vrši se samo rafinacija do komercijalnih legura, a ne do osnovnog metala. Primena sekundarnih metala, dobijenih post-industrijskom reciklažom, pogodnija je za upotrebu u odnosu na prerađeni otpad na kraju životnog veka proizvoda, zbog veće energetske efikasnosti prvog procesa. Povratni metal dobijen recikliranjem post-industrijskog ili post-upotrebnog otpadnog materijala, ima manje ekološke uticaje po jedinici zapremine proizvoda u odnosu na iskopavanje i ekstrakciju čistih metala. Zamenom čistih metala recikliranim u lemni legurama, smanjuje se sveukupni uticaj životnog ciklusa lemova u nekoliko kategorija. Značaj faze primene i relativne termalne neefikasnosti opreme optimizirane za proizvodnju SnPb, daje mogućnost smanjenja potrošnje energije tokom dobijanja bezolovni lemni legura kroz dalju modifikaciju opreme i samog proizvodnog procesa. Potrošnja energije se može značajno smanjiti zamenom zastarelih i manje efikasni delova opreme, optimizacijom tekuće opreme koja bi radila u uslovima povećanih temperatura neophodni za dobijanje bezolovni lemova.

ZAKLJUČAK

Identična adekvatna zamena kalajno-olovni lemni legurama još uvek nije otkrivena. Preokret ka bezolovni lemovima utiče na mnoge aspekte procesa proizvodnje i primene, a što sve mora biti detaljno proučeno od strane proizvođača, radi uspešne implementacije bezolovni lemni legura u elektronici. Analizom životnog ciklusa lemni legura, prikazanom u radu, kao jednim od alternativni pristupa proučavanju navedeni legura, dat je doprinos boljem poznavanju tzv. «ekoloških» lemova sa aspekta njihovog uticaja na životnu sredinu i ljudsko zdravlje. U radu je dato i poređenje između različitih vrsta uticaja olovni i bezolovni lemni legura, i navedene potencijalne mogućnosti za smanjenje negativni uticaja istih na ekologiju i zdravlje ljudi.

LITERATURA

- [1] T.C. Kuo, H.C. Zhang, Life cycle engineering: Design for recyclability. In: Proc. of the 1st World Conference on Integrated Design and Process Technology, 1995, 1–7.
- [2] J.J. Lee, P. O’Callaghan, D. Allen, Critical review of life cycle analysis and assessment techniques and their application to commercial activities, *Resour. Conserv. Rec.* **13** (1995) 37–56.
- [3] J. Sarkis, Evaluating environmentally conscious business practices, *Eur. J. Oper. Res.* **107** (1) (1998) 159–174.
- [4] J. Muransky, Evaluation of the environmental level of manufacturing systems and their innovation, Proceedings of 10th International Conference on Industrial Systems IS 96, IISE, Novi Sad, 1996.
- [5] J. Bath, C. Handwerker, E. Bradley, Research Update: Lead-Free Solder Alternatives, *Circuits Assembly*, 2000, 31–40.
- [6] Group of Authors, Solders in Electronics: A Life Cycle Assessment Summary, USA Environmental Protection Agency, University of Tennessee, 2005.
- [7] AIM, A Study of Lead-Free Wave Soldering, Fact Sheet, 2001 (www.aimsolder.com).
- [8] C. Ashmore, Will Your Printing Process be Affected by Pb-Free?, *Circuits Assembly*, 2005, p. 22 (<http://circuitsassembly.com>).
- [9] J. Hwang, K. Chew, V. Kho, Lead-free implementation: drop-in manufacturing, Apex 2004, Technical Conference Proceedings, Anaheim, CA, 2004.
- [10] B. Lange, J. Huckabee, D. Romm, Component Supplier’s Qualification of Lead-Free Green Package Solutions, *Electronics Goes Green*, Berlin, 2004.
- [11] B. McGrath, The Effects of Lead-Free on PCB Fabrication, *Printed Circuit Design and Fabrication*, 2005, 44–47 (<http://pcdandm.com>).
- [12] J. Morris, M. O’Keefe, Equipment Impacts of Lead-Free Wave Soldering, Apex 2003, Proceedings, Anaheim, CA, 2003.
- [13] J. Sprovieri, Stirring the Pot, *Assembly Magazine*, 2004 (<http://www.assemblymag.com>).
- [14] K. Sweatman, S. Suenaga, M. Yoshimura, T. Nishimura, Erosion of copper and stainless steel by lead-free wave solder, Proceedings of IPC Printed Circuits Expo, 2004.
- [15] AIM(a), AIM Lead-Free Soldering Guide: Alloys, Chemistries, Data, Experience, Consultation (www.aimsolder.com).
- [16] AIM(b), Technical Data Sheet: Technical Articles: Lead-free Product Data Sheets (www.aimsolder.com).
- [17] J. Bath, C. Handwerker, E. Bradley, Research Update: Lead-Free Solder Alternatives, *Circuits Assembly*, 2000, 31–40 (www.circuitassembly.com).
- [18] A. Grusd, C. Jorgensen, Lead-FREE Alloys: Fitting the Square Peg in the Square Hole, *Circuitree*, 1999, 98–102.
- [19] Y. Kariya, W.J. Plumbridge, Mechanical Properties of Sn-3.0 mass% Ag–0.5 mass% Cu Alloy, Materials Engineering Dep., The Open University, U.K.
- [20] J.H. Lau, C.P. Wong., N.-C. Lee, S.W.R. Lee, Electronics Manufacturing With Lead-Free, Halogen-Free & Conductive-Adhesive Materials, 13,2000, p. 1–62.
- [21] National Institute of Standards & Technology (NIST) and Colorado School of Mines (CSM), Database for Solder Properties with Emphasis on New Lead-free Solders Release 4.0, 2002 (www.boulder.nist.gov).
- [22] M. Ochiai, T. Akamatsu, H. Ueda, Reliability of Solder Joints Assembled with Lead-Free Solder, *Fujitsu Sci. Technol. J.* **38** (1) (2002) 96–101.
- [23] W.J. Plumbridge, The Solder Programme at the Open University Materials, Engineering Department, Mat. Eng. Dep., UK, 2001.
- [24] S. Quan, C. Bradshaw, S. Kwiatek, Properties of Lead Free Alloy and Performance Properties of Lead Free No-Clean Solder Paste, IPC SMEMA Council APEX, 2002 (www.goapex.org).
- [25] K. Seelig, D. Suraski, Materials and Process Considerations for Lead-Free Electronics Assembly, 2002 (www.aimsolder.com/techarticles).
- [26] K.A. Matis, K. Lazaridis, Flotation techniques in water technology for metals recovery: Dispersed-air vs. Dissolved-air flotation, *J. Min. Metall. A* **38** (1–4) (2002) 1–27.

SUMMARY**LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) OF LEAD-FREE SOLDERS FROM THE ENVIRONMENTAL PROTECTION ASPECT**

Aleksandra M. Mitovski, Dragana T. Živković, Ljubiša T. Balanović, Nada D. Štrbac, Živan D. Živković

University of Belgrade, Technical Faculty, Bor, Serbia

(Professional paper)

Life-cycle assessment (LCA) presents a relatively new approach, which allows comprehensive environmental consequences analysis of a product system over its entire life. This analysis is increasingly being used in the industry, as a tool for investigation of the influence of the product system on the environment, and serves as a protection and prevention tool in ecological management. This method is used to predict possible influences of a certain material to the environment through different development stages of the material. In LCA, the product systems are evaluated on a functionally equivalent basis, which, in this case, was 1000 cubic centimeters of an alloy. Two of the LCA phases, life-cycle inventory (LCI) and life-cycle impact assessment (LCIA), are needed to calculate the environmental impacts. Methodology of LCIA applied in this analysis aligns every input and output influence into 16 different categories, divided in two subcategories. The life-cycle assessment research review of the lead-free solders Sn–Cu, SAC (Sn–Ag–Cu), BSA (Bi–Sb–Ag) and SABC (Sn–Ag–Bi–Cu) respectively, is given in this paper, from the environmental protection aspect starting from production, through application process and finally, reclamation at the end-of-life, *i.e.* recycling. There are several opportunities for reducing the overall environmental and human health impacts of solder used in electronics manufacturing based on the results of the LCA, such as: using secondary metals reclaimed through post-industrial recycling; power consumption reducing by replacing older, less efficient reflow assembly equipment, or by optimizing the current equipment to perform at the elevated temperatures required for lead-free soldering, etc. The LCA analysis was done comparatively in relation to widely used Sn–Pb solder material. Additionally, the impact factors of material consumption, energy use, water and air reserves, human health and ecotoxicity have been ALSO considered including the potentials for dissolution and recycling processes.

Ključne reči: LCA • Životni ciklus • Bezolovne lemne legure

Key words: LCA • Life cycle • Lead-free solders