

Uloga recikliranja aluminijskih limenki u kružnom gospodarstvu

Grubišić, Lea

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:689681>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Lea Grubišić

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Lea Grubišić

ULOGA RECIKLIRANJA ALUMINIJSKIH LIMENKI
U KRUŽNOM GOSPODARSTVU

Voditelj: izv. prof. dr.sc. Ivan Jandrlić

Stručna voditeljica: Lorena Mrkobrada, mag. ing. met.

Članovi povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

prof. dr. sc. Anita Begić Hadžipašić – predsjednica

izv. prof. dr. sc. Ivan Jandrlić – član

doc. dr. sc. Tin Brlić – član

doc. dr. sc. Ivana Ivanić – zamjenska članica

Sisak, rujan 2023.

IME: Lea
PREZIME: Grubišić
MATIČNI
BROJ: BE-3684/20

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj **završni** / diplomski / doktorski rad pod naslovom:

ULOGA RECIKLIRANJA ALUMINIJSKIH LIMENKI U KRUŽNOM

GOSPODARSTVU

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristila drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, _____

(vlastoručni potpis)

Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.



KLASA: 602-03/23-05/04

URBROJ: 2176-78-23-01- 95

Sisak, 14. lipnja 2023.

Temeljem točke IX. Naputka o završnom radu i završnom ispitu Pravilnika o studiranju na preddiplomskim studijima i diplomskom studiju Metalurškog fakulteta i članka 23. Statuta Metalurškog fakulteta, Fakultetsko vijeće na svojoj 9. redovitoj sjednici u akad. god. 2022./2023. od 14. lipnja 2023. godine (t. 3), a na prijedlog Povjerenstva za nastavu, donosi sljedeću

ODLUKU

o odobravanju teme, imenovanju voditelja i Povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada

- I.
Studentici sveučilišnog prijediplomskog studija *Metalurgija*, smjer *Industrijska ekologija* u redovitom statusu **LEI GRUBIŠIĆ** (0124125046) za voditelja završnog rada pod naslovom "Uloga recikliranja aluminijskih limenki u kružnom gospodarstvu" ("The role of recycling aluminum cans in a circular economy") imenuje se **izv. prof. dr. sc. Ivan Jandrić**, a za stručnu voditeljicu **Lorena Mrkobrada**, mag. ing. met.
- II.
Studentici iz točke I. ove Odluke imenuje se Povjerenstvo za ocjenu i obranu završnog rada u sastavu:
1. prof. dr. sc. Anita Begić Hadžipašić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – predsjednica,
2. izv. prof. dr. sc. Ivan Jandrić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – član,
3. doc. dr. sc. Tin Brlić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – član.
Za zamjensku članicu imenuje se doc. dr. sc. Ivana Ivanić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet.
- III.
Ova Odluka stupa na snagu danom donošenja.
- IV.
Protiv ove Odluke može se uložiti prigovor Fakultetskom vijeću Metalurškog fakulteta u roku 8 dana od dana primitka iste.

Dostavljeno:

- 1 x Lea Grubišić
- 1 x voditelji, članovi Povjerenstva, stručna voditeljica
- 1 x Studentska referada
- 1 x Tajništvo
- 1 x pismohrana Fakultetskog vijeća
- 1 x pismohrana

Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet
Aleja narodnih heroja 3; p.p.1; HR - 44103 Sisak
tel.: +385(0)44 533378; 533379; 533380; 533381
faks: +385(0)44 533375
e-mail: dekana@smet.hr; url: www.smet.unizg.hr

Vršitelj dužnosti dekana
Metalurškog fakulteta

prof. dr. sc. Nikola Mrvac

Vanić

Zahvaljujem se voditelju rada izv.prof.dr.sc. Ivanu Jandrliću na pomoći, strpljenju i vremenu posvećenom za pisanje završnog rada. Također se želim zahvaliti i stručnoj voditeljici Loreni Mrkobradi, mag.ing.met., koja je savjetima uvelike pomogla u realizaciji rada.

Tvrtki Depos d.o.o. hvala na susretljivosti i velikoj pomoći, svim dobivenim materijalima te želji da me uvedu u rad pogona.

Posebno bih se htjela zahvaliti svojoj obitelji koja je u svakom trenutku bila najveća podrška, pogotovo kada je to bilo najpotrebnije. Veliko hvala i mojim prijateljima zbog kojih je studiranje zabavnije.

Istraživanja za izradu ovog rada provedena su u okviru istraživačkog projekta IP-124-IJ Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, i na opremi u okviru infrastrukturnih projekata Centar za ljevarstvo - SIMET, KK.01.1.1.02.0020 i VIRTULAB - Integrated laboratory for primary and secondary raw materials, KK.01.1.1.02.0022.

ULOGA RECIKLIRANJA ALUMINIJSKIH LIMENKI U KRUŽNOM GOSPODARSTVU

SAŽETAK

Završni rad obrađuje temu kružnog gospodarstva s naglaskom na ulogu metalurgije i recikliranja aluminijske ambalaže u kružnom gospodarstvu.

U prvom dijelu dan je pregled ekonomskih, ekoloških i drugih aspekata vezanih uz recikliranje aluminijskih proizvoda, ali i na smanjenje ovisnosti o ograničenim prirodnim resursima. Naglasak je stavljen na aluminijske limenke, jer čine većinu oporabljenih aluminijskih proizvoda, a njihovim recikliranjem postiže se izuzetno kvalitetna talina aluminijska kao osnova za formiranje gotovih proizvoda lijevanjem ili novih legura daljnjom obradom taline.

U drugom dijelu rada opisuje se dobar primjer prakse u recikliranju aluminijskih limenki. U dvije odvojene faze prerade ispitana su mehanička svojstva, kemijski sastav i strukturna analiza ostvarenih talina. Navedenim ispitivanjima utvrđeno je da recikliranjem aluminijskih limenki, pored izuzetno pozitivnih ekonomskih i ekoloških pokazatelja, dobivamo veoma čist aluminijski, upotrebljiv kao dezoksidans u proizvodnji čelika, ali i kao odličnu sirovinu za proizvodnju novih aluminijskih legura.

Ključne riječi: recikliranje, aluminijski, limenke, mehanička ispitivanja

THE ROLE OF RECYCLING ALUMINUM CANS IN A CIRCULAR ECONOMY

ABSTRACT

The final paper deals with the topic of the circular economy with an emphasis on the role of metallurgy and recycling of aluminum packaging in the circular economy.

In the first part, there is an overview of economic, ecological and other aspects related to the recycling of aluminum products, but also on the reduction of dependence on limited natural resources. Emphasis is placed on aluminum cans, because they make up the majority of recycled aluminum products, and their recycling results in an extremely high-quality aluminum melt as the basis for the formation of finished products by casting, or development of new alloys by further processing of the melt.

In the second part of this final paper, a good example of practice in recycling aluminum cans is described. In two separate stages of processing, the mechanical properties, chemical composition and structural analysis of the resulting melts were tested.

The above mentioned experiments have concluded that by recycling aluminum cans, in addition to extremely positive economic and ecological indicators, we obtain very pure aluminum, which can be used as a deoxidizer in the production of steel, but also as an excellent raw material for production of new aluminum alloys.

Key words: recycling, aluminium, cans, mechanical testing

Sadržaj:

1. UVOD	1
2. KRUŽNO GOSPODARSTVO	2
2.1. Sirovine	2
2.2. Dizajn	3
2.3. Proizvodnja i prerada	3
2.4. Distribucija	3
2.5. Korištenje, ponovno korištenje, popravak.....	3
2.6. Prikupljanje	3
2.7. Recikliranje	4
2.7.1. Preostali otpad.....	4
2.8. Moguća rješenja	4
2.9. Metaloprerađivačka industrija u kružnom gospodarstvu	4
3. ALUMINIJ	6
3.1. Općenito i upotreba	6
3.2. Primarna proizvodnja aluminijske legure	7
3.3. Sekundarna proizvodnja aluminijske legure	10
3.3.1. Proces recikliranja aluminijske legure i aluminijskih legura.....	11
3.4. Aluminij u kružnom gospodarstvu	12
3.5. Oporaba aluminijske ambalaže u tvrtki CIAL d.o.o.	14
4. EKSPERIMENTALNI DIO	18
4.1. Statičko vlačno ispitivanje	19
4.2. Strukturna ispitivanja	21
4.3. Mjerenje tvrdoće	23
5. REZULTATI I RASPRAVA	24
5.1. Rezultati kemijskog sastava na spektrometru SPECTROMAXx	24
5.2. Rezultati mehaničkih ispitivanja	24
5.3. Rezultati metalografske analize	27
6. ZAKLJUČAK	30
7. LITERATURA.....	31

1. UVOD

U današnjem svijetu suočenim s rastućim izazovima održivosti i zaštite okoliša, kružno gospodarstvo se sve više ističe kao ključni koncept za postizanje održivog razvoja. Kružno gospodarstvo promiče iskorištavanje vrijednosti materijala i resursa kroz recikliranje, ponovnu upotrebu i obnovu kako bi se smanjio otpad, potrošnja prirodnih sirovina i negativni utjecaji na okoliš [1]. U tom kontekstu, recikliranje aluminijskih limenki igra ključnu ulogu u postizanju ciljeva kružnog gospodarstva [2].

Aluminij je izuzetno vrijedan materijal koji se često koristi u raznim industrijama, uključujući prehrambenu, automobilsku i građevinsku industriju [3]. Aluminijske limenke posebno su poznate zbog svoje male mase, čvrstoće i trajnosti kao i mogućnosti recikliranja [4].

U prvom dijelu rada pobliže su prikazani ciljevi kružnog gospodarstva, te moguća rješenja kako bi se poboljšao ukupan proces. U sklopu ovog dijela istaknut će se uloga metaloprerađivačke industrije u kružnom gospodarstvu. Industrija metala ima širok raspon primjene, no fokus u ovom radu je stavljen na aluminij i recikliranje aluminijske ambalaže, kao bitan faktor u smanjenju emisije stakleničkih plinova i postizanja ciljeva kružnog gospodarstva.

Drugi dio rada opisuje proces reciklaže povratne aluminijske ambalaže. Navode se ključni aspekti recikliranja aluminijskih limenki u kontekstu kružnog gospodarstva. Dan je dobar primjer procesa recikliranja Al limenki, uključujući prikupljanje, sortiranje, obradu i ponovno korištenje aluminijskog materijala.

U eksperimentalnom dijelu opisana su istraživanja kvalitete i ispitivanja mehaničkih svojstava te analiza strukture ostvarenih talina po fazama prerade aluminijskih limenki. Cilj istraživanja je ustanoviti sastav i svojstva metala dobivenog recikliranjem aluminijskih limenki, mogućnosti njegove primjene bez i s dodavanjem legirajućih elemenata.

2. KRUŽNO GOSPODARSTVO

Kružno gospodarstvo, slika 1, je ekonomski model kojemu je cilj smanjiti otpad i učinkovito iskoristiti resurse [1]. Umjesto tradicionalnog linearnog modela gospodarstva koji se temelji na "uzmi, koristi i baci" pristupu, kružno gospodarstvo promiče kontinuiranu uporabu resursa putem ciklusa korištenja, obnove i recikliranja kako bi se stvorio održiv i resursno učinkovit sustav. Model kružnog gospodarstva se temelji na sirovinama, dizajnu, proizvodnji, preradi, distribuciji, korištenju, popravku, prikupljanju i recikliranju, s ciljem smanjenja konačnog otpada na 0% [5, 6].



Slika 1. Prikaz kružnog gospodarstva [7]

2.1. Sirovine

Kružno gospodarstvo teži smanjenju ovisnosti o ekstrakciji i korištenju primarnih sirovina iz prirode. Minimalizacija korištenja primarnih sirovina pomaže u očuvanju prirodnih ekosustava, smanjenju negativnih utjecaja na okoliš i štednji resursa.

Reciklirane sirovine su materijali koji su već bili korišteni i prošli kroz reciklažu ili ponovnu upotrebu te su spremni za daljnju upotrebu u proizvodnom procesu. Sirovine mogu uključivati reciklirane materijale poput recikliranog papira, plastike, metala ili stakla. Korištenje recikliranih sirovina smanjuje potrebu za novim ekstrakcijama prirodnih sirovina.

Kružno gospodarstvo potiče korištenje obnovljivih sirovina koje se mogu regenerirati u kratkom vremenskom periodu. To uključuje korištenje biomase, drva, biljnih vlakana ili drugih materijala koji dolaze iz obnovljivih izvora. Obnovljive sirovine su održive jer se mogu ponovno obnoviti brže nego što se koriste, što smanjuje pritisak na prirodne ekosustave [8].

2.2. Dizajn

U kružnom gospodarstvu, dizajn igra ključnu ulogu u postizanju održivosti i učinkovitosti u upravljanju resursima.

Dizajniranje proizvoda ili usluga s naglaskom na dugotrajnost je ključni aspekt kružnog gospodarstva. Umjesto da se stvaraju proizvodi koji su namijenjeni kratkom vijeku trajanja, cilj je stvoriti kvalitetne proizvode koji mogu izdržati dulje vrijeme korištenja. To uključuje korištenje izdržljivih materijala, osiguranje lakoće popravka i zamjene dijelova te poticanje korisnika na produženo korištenje proizvoda.

Proizvodi bi trebali biti dizajnirani tako da se mogu lako rastaviti na komponente i materijale koji se mogu reciklirati ili ponovno upotrijebiti. Ovaj koncept se naziva "dizajn za demontažu". Olakšavanje procesa rastavljanja i identifikacija materijala olakšava recikliranje i smanjuje gubitak vrijednih resursa [9, 10].

2.3. Proizvodnja i prerada

Prvi korak u procesu prerade je razdvajanje i sortiranje otpada. Otpad se razvrstava prema svojim karakteristikama, kao što su vrsta materijala ili kemijski sastav. Na primjer, papir, plastika, staklo i metal mogu se odvojeno prikupljati kako bi se olakšalo njihovo daljnje recikliranje. Ovaj korak je usko povezan uz nadolazeći korak recikliranja [11].

2.4. Distribucija

Kružno gospodarstvo teži minimiziranju udjela ugljika i resursa koji se troše tijekom transporta. To uključuje optimizaciju logističkih procesa kako bi se smanjile emisije stakleničkih plinova i potrošnja goriva. Primjeri uključuju korištenje efikasnih ruta, preraspodjelu tereta, upotrebu vozila s manjom potrošnjom goriva i poticanje alternativnih oblika prijevoza poput električnih vozila ili dostave biciklima [12, 13].

2.5. Korištenje, ponovno korištenje, popravak

Kružno gospodarstvo potiče produljenje životnog vijeka proizvoda kroz održavanje, popravke i obnovu. Umjesto da se proizvod zamijeni kada se pokvari ili se smatra zastarjelim, korisnike se potiče da proizvode poprave, zamijene dijelove ili nadgrade kako bi im produžili vijek trajanja. Ovo smanjuje ukupnu količinu otpada i potrošnju resursa te promiče održivu upotrebu proizvoda.

Kružno gospodarstvo potiče praksu dijeljenja i zajedničkog korištenja proizvoda među korisnicima. To uključuje platforme i mreže za dijeljenje resursa poput alata, elektronike, prijevoza ili prostora. Umjesto da svaka osoba posjeduje vlastiti set proizvoda, korisnici mogu dijeliti i zajednički koristiti proizvode, što smanjuje potrebu za proizvodnjom novih proizvoda i ukupnu potrošnju resursa [14].

2.6. Prikupljanje

Ovaj korak u kružnom gospodarstvu odnosi se na proces prikupljanja otpada i korištenih proizvoda radi njihovog daljnjeg tretmana, recikliranja ili ponovne upotrebe. Cilj je osigurati učinkovit i organiziran sustav prikupljanja kako bi se maksimizirala povratna vrijednost materijala i minimizirao otpad koji završava na odlagalištima ili u okolišu.

Kružno gospodarstvo promiče prikupljanje odvojenog otpada, što znači da se različiti materijali odvajaju pri izvoru kako bi se omogućilo njihovo efikasno recikliranje ili ponovna upotreba.

Korisnici trebaju biti informirani o tome kako pravilno razvrstavati i odlagati otpad te kako ispravno koristiti dostupne prikupne sustave. Ovo uključuje pružanje jasnih smjernica, edukaciju putem kampanja i suradnju s lokalnim zajednicama kako bi se osiguralo ispravno odlaganje i recikliranje [10].

2.7. Recikliranje

Odnosi se na proces korištenja otpada i korištenih materijala kao sirovine za proizvodnju novih proizvoda, umjesto da završe kao otpad na odlagalištima ili u okolišu. Nakon navedenih koraka, recikliranje je zadnji korak prije ponovnog korištenja materijala u novom proizvodu [5, 15].

2.7.1. Preostali otpad

Cilj ovog koraka je minimizirati količinu preostalog otpada koji završava na odlagalištima i smanjiti njegov negativni utjecaj na okoliš. To je otpad koji se ne može reciklirati, ponovno upotrijebiti ili pretvoriti u nove sirovine.

Otpad koji se ne može reciklirati ili ponovno upotrijebiti može se podvrgnuti alternativnim tretmanima, umjesto da završi na odlagalištu. Primjeri alternativnih tretmana uključuju termičku obradu otpada (poput spaljivanja s uporabom energije), biološku obradu (kompostiranje) ili kemijske procese koji omogućuju pretvorbu otpada u korisne proizvode poput bioplastike ili biogoriva [16].

2.8. Moguća rješenja

Implementacija kružnog gospodarstva zahtijeva suradnju između različitih dionika, uključujući vlade, industriju, potrošače i organizacije civilnog društva. Potrebne su promjene u zakonodavstvu i politici kako bi se potaknuo prelazak na kružno gospodarstvo, kao što su poticaji za recikliranje i obnovu, ograničenja na uporabu štetnih materijala te poticanje inovacija u dizajnu proizvoda.

Pored toga, edukacija i podizanje svijesti među potrošačima o prednostima kružnog gospodarstva također je važno. Potrošači mogu birati proizvode koji su trajniji, koji se mogu reciklirati ili dolaze iz održivih izvora. Poduzeća mogu implementirati programe vraćanja proizvoda ili recikliranja kako bi potrošačima omogućili jednostavnije sudjelovanje u kružnom gospodarstvu.

Kružno gospodarstvo se već široko primjenjuje u različitim sektorima i regijama diljem svijeta. Primjeri uključuju recikliranje plastike za proizvodnju novih proizvoda, uporabu otpadne topline iz industrijskih postrojenja za grijanje domova, kao i razvoj poslovnih modela usmjerenih na pružanje usluga i dijeljenje resursa [17].

2.9. Metaloprerađivačka industrija u kružnom gospodarstvu

Metaloprerađivačka industrija ima ključnu ulogu u kružnom gospodarstvu zbog svoje sposobnosti recikliranja i prerade različitih metala. S obzirom na široku upotrebu metala i metalnih legura u različitim granama industrije, metalni otpad stvara se iz različitih izvora, slika 2.



Slika 2. Primjer metalnog otpada [18]

Primjeri otpada iz kojih se generira metalni otpad su automobili, elektronika, građevinski otpad i industrijski otpad, a može se prikupiti, sortirati, rastaviti i reciklirati. Time se omogućuje ponovna upotreba metala, te se smanjuje potreba za ekstrakcijom novih sirovina [19]. Također, reciklirani metal može biti jeftinija alternativa primarnom metalu, što može rezultirati smanjenjem troškova proizvodnje za različite sektore. Kroz suradnju s drugim sektorima, kao što su proizvođači i dobavljači, mogu se uspostaviti zatvoreni tokovi materijala i potaknuti kružni model poslovanja [1]. Metaloprerađivačka industrija pomaže u osiguranju dugoročne opskrbe sirovinama. Korištenje recikliranih metala smanjuje ovisnost o ograničenim prirodnim resursima i pomaže u stabilizaciji opskrbe sirovinama za industriju.

Kroz recikliranje metala, mogu se razviti novi materijali i legure s poboljšanim karakteristikama, što otvara nove mogućnosti u dizajnu proizvoda. Na primjer, reciklirani čelik može se koristiti u građevinskoj industriji za izgradnju održivih i energetski učinkovitih zgrada. Također, reciklirani aluminij može se koristiti za proizvodnju laganih i izdržljivih komponenti u automobilskoj industriji. Konstantna istraživanja i inovacije usmjereni su na razvoj naprednih tehnologija i procesa za učinkovito i održivo recikliranje metala. To uključuje napredne metode sortiranja, rastavljanja i prerade metala, kao i poboljšanja u energetske učinkovitosti procesa.

Gledajući samo primjer recikliranja aluminijskog otpada i proizvodnje početne taline značajno je manja potrošnja energenata, vode i vremena. Ujedno pri taljenju aluminijskog otpada značajno je manja emisija štetnih plinova i prašine u odnosu na primarnu proizvodnju. Sve to doprinosi smanjenju utjecaja na okoliš, manjoj emisiji onečišćujućih tvari, kao i zagađenju voda.

Ukratko, metaloprerađivačka industrija ima ključnu ulogu u kružnom gospodarstvu kroz recikliranje metala, smanjenje negativnog ekološkog učinka, očuvanje prirodnih resursa, poticanje inovacija i suradnje te osiguravanje dugoročne opskrbe sirovinama. Njezina uloga pridonosi održivosti, smanjenju otpada i stvaranju ekonomije koja maksimalno koristi postojeće resurse.

Neki od najčešćih materijala koji se recikliraju su željezo i njegove legure, bakar i njegove legure te aluminij i njegove legure. Poticanjem kružnog gospodarstva, sve se više pažnje posvećuje recikliranju aluminijskog otpada i njegovih legura na kojem će i biti fokus u ovome radu [20-22].

3. ALUMINIJ

3.1. Općenito i upotreba

Aluminij, slika 3, je srebrnobijeli mekan metal s izraženom reflektivnošću.



Slika 3. Aluminij [23]

Vrlo je lagan s gustoćom od samo 2,7 grama po kubičnom centimetru, što je otprilike trećina gustoće čelika. Dobro provodi električnu i toplinsku energiju. Aluminij je treći najrasprostranjeniji element u Zemljinoj kori, nakon kisika i silicija, ali ne nalazi se u elementarnom obliku zbog svoje reaktivnosti. Aluminij se obično nalazi u spojevima s drugim elementima, najčešće u obliku boksita, koji je glavni izvor primarnog aluminija [24].

Aluminij ima prirodnu zaštitnu oksidnu prevlaku koja ga štiti od korozije jer se prilikom izloženosti zraku formira tanki sloj aluminijevog oksida koji sprječava daljnju oksidaciju metala. Međutim, aluminij može biti osjetljiv na određene kemikalije i elektrokemijske uvjete. Iznimno je fleksibilan metal koji se lako može oblikovati, slika 4.

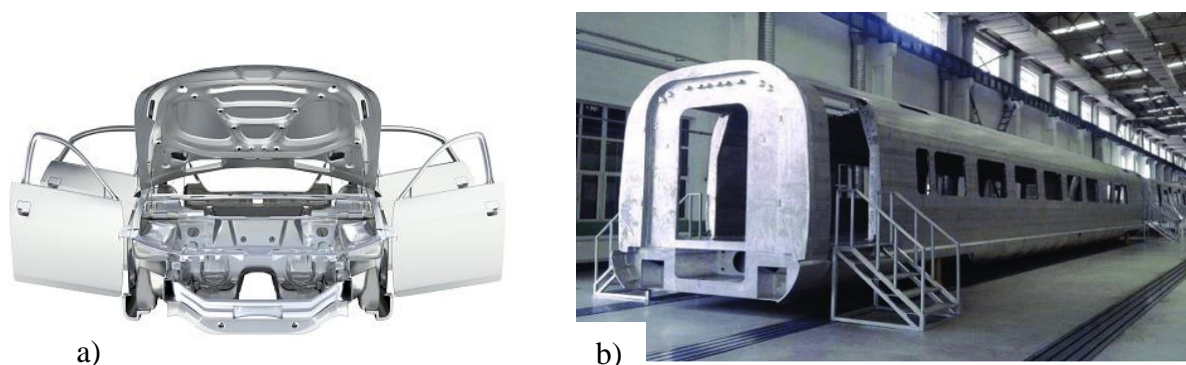


Slika 4. Oblikovani aluminij [25]

Može se valjati u tanke limove, izvlačiti u žice i oblikovati u razne oblike i profile. Aluminij ima relativno nisku temperaturu taljenja od oko 660 °C, što mu omogućuje da se lako tali i lijeva na nižim temperaturama u usporedbi s drugim metalima poput čelika ili bakra. Ovo svojstvo olakšava procese lijevanja i oblikovanja aluminija u raznim industrijskim procesima. Netoksičan je metal, što ga čini sigurnim za upotrebu u različitim područjima. Iako je lagan metal, ima zadovoljavajuću čvrstoću. Legiranjem aluminija dobivaju se legure koje zadržavaju svoju čvrstoću i stabilnost, čak i pri povišenim temperaturama. Uz sve prednosti, ima i

privlačan izgled te sjajnu površinu. Može se lako polirati i eloksirati, ali mogu se nanositi i zaštitne prevlake kako bi se postigao željeni izgled [26].

Ova vrsta metala kombinira mnoge iznimne karakteristike i zbog toga su aluminij i njegove legure ključni materijal u mnogim industrijskim sektorima sa širokom primjenom. Često se koriste u građevini kao što su prozorski okviri, vrata, fasadni pokrovi, krovovi i cijevi te u transportnoj industriji, slika 5 a) i b) [27].



Slika 5. a) aluminij u automobilima [28], b) aluminij u vlakovima [29]

Upotreba legura aluminija u transportu može smanjiti ukupnu masu vozila i poboljšati energetska učinkovitost. U elektroničkim uređajima koristi se za hladila, kućišta mobilnih telefona, stolnih i prijenosnih računala i televizora [30]. Aluminijevi spojevi koriste se i u izradi kondenzatora i električnih vodova zbog svoje visoke vodljivosti. Ima i važnu ulogu u sektoru energije. Koristi se u proizvodnji solarnih panela, gdje služi za okvire i strukture zbog svoje male težine i otpornosti na koroziju. Također se koristi u vjetroelektranama za izradu pogonskih lopatica zbog svoje čvrstoće i male mase. Ujedno se koristi u medicinskim uređajima, poput proteza i kirurških instrumenata zbog male toksičnosti i odlične precizne obradljivosti. Njegova visoka električna vodljivost čini ga idealnim za prijenos električne energije, pa se koristi u proizvodnji žica i kablova. Poznat je materijal u sportskoj industriji za izradu sportske opreme poput bicikala, teniskih reketi i planinarske opreme [27, 30].

Aluminij se koristi u pakiranju hrane i pića u obliku limenki koje su lagane, nepropusne i imaju dugi vijek trajanja. Ovaj metal je također visoko reciklabilan materijal, što ga čini ključnim elementom kružnog gospodarstva [26, 31].

3.2. Primarna proizvodnja aluminija

Primarna proizvodnja aluminija započinje ekstrakcijom boksita, slika 6, koji se prerađuje u aluminijev oksid putem procesa poznatog kao Bayerov proces. Zatim se aluminijev oksid pretvara u primarni aluminij putem elektrolize u procesu poznatom kao Hall-Héroultov proces. Primarni aluminij se obično koristi za proizvodnju različitih legura i gotovih proizvoda [30].



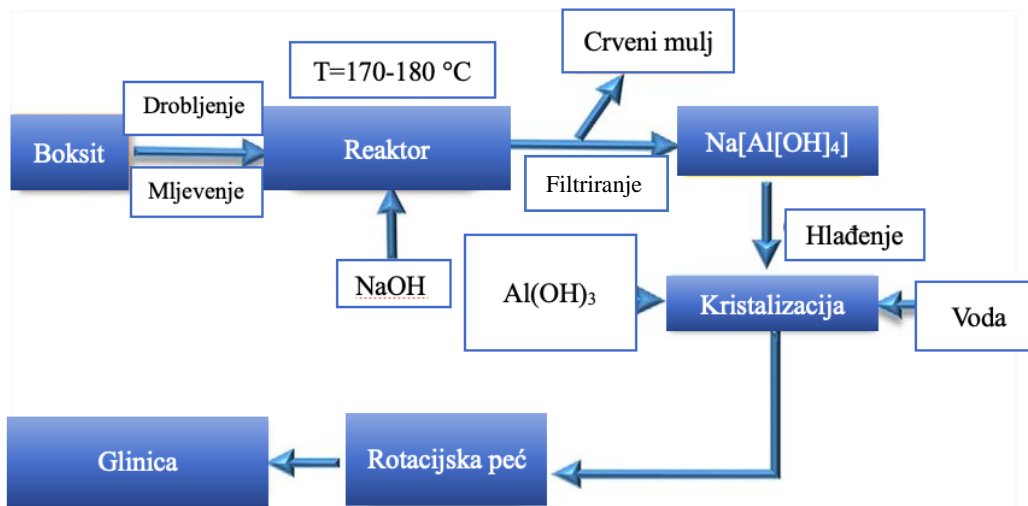
Slika 6. Boksit [32]

Boksit, prirodna ruda koja sadrži aluminij, najprije se melje mlinovima u fini prah kako bi se povećala površina izložena kemijskim reakcijama. Mljevena smjesa boksita zatim se miješa s lužinom (natrijevim hidroksidom, NaOH) u velikim spremnicima poznatim kao digestori ili autoklavi. U digestoru se provodi proces digestije, koji podrazumijeva zagrijavanje smjese na visoke temperature i visok tlak. Tijekom digestije, natrijev hidroksid reagira s aluminijskim oksidima u boksitu, a rezultat toga je stvaranje natrijevog aluminata (NaAlO_2). Ova reakcija se naziva alkalna digestija. Ostali neželjeni minerali i primjese u boksitu ostaju neotopljene i formiraju talog. Nakon završetka digestije, smjesa se prenosi u posebne spremnike za separaciju taloga.

U spremnicima za separaciju taloga formira se talog na dnu, dok se tekuća faza koja sadrži natrijev aluminat i višak lužine odvaja na vrhu. Talog se zatim odvaja od tekućine, a tekuća faza se vraća nazad u proces. Talog koji je odvojen iz tekućine podvrgava se procesu kalcinacije što podrazumijeva zagrijavanje taloga na visokim temperaturama (obično iznad $1000\text{ }^\circ\text{C}$) kako bi se pretvorio u aluminijev oksid (Al_2O_3). Kalcinacija također služi za uklanjanje vlage i nečistoća iz taloga. Aluminijev oksid dobiven iz kalcinacije taloga ponovno reagira s lužinom u procesu nazvanom hidratacija. Ovaj proces uključuje miješanje aluminijevog oksida s lužinom kako bi se formirao aluminijski hidroksid [$\text{Al}(\text{O}_2)(\text{OH})_3$]. Aluminijev hidroksid je stabilan spoj koji se koristi kao međuproizvod za daljnju proizvodnju aluminijskih spojeva. Nakon hidratacije, smjesa se ohladi i provodi se proces kristalizacije, prilikom čega se aluminijski hidroksid taloži i formiraju se kristali koji se zatim odvajaju od tekuće faze korištenjem postupaka filtracije ili centrifugiranja. Dobiveni aluminijski hidroksid može se koristiti za različite svrhe kao sirovina za proizvodnju aluminijske ili za druge industrijske primjene.

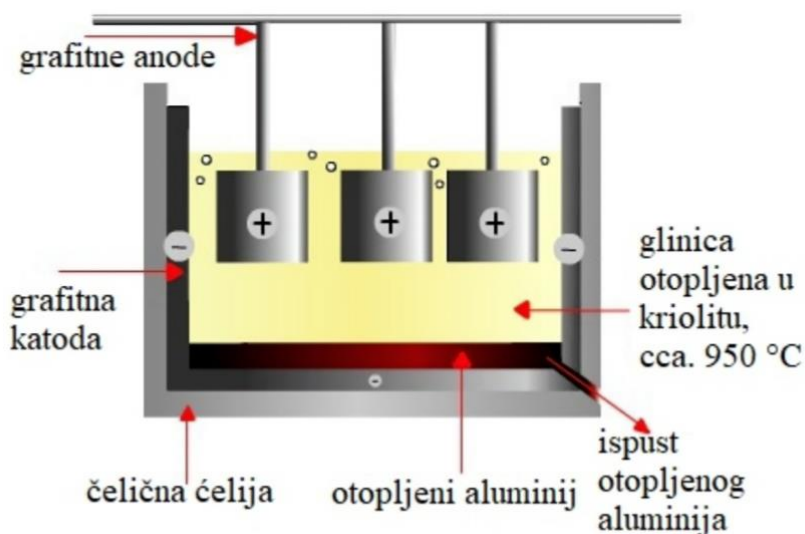
Tekuća faza koja je odvojena tijekom separacije taloga sadrži preostalu lužinu i neke nečistoće. Prije ponovne uporabe, lužina se obično pročišćava i regenerira kako bi se uklonile nečistoće i ponovno povećala njena učinkovitost, pri digestiji boksita [33, 34].

Bayerov proces, slika 7, omogućuje ekstrakciju aluminijske ili za druge industrijske primjene. Bayerov proces, slika 7, omogućuje ekstrakciju aluminijske ili za druge industrijske primjene. Bayerov proces, slika 7, omogućuje ekstrakciju aluminijske ili za druge industrijske primjene. Bayerov proces, slika 7, omogućuje ekstrakciju aluminijske ili za druge industrijske primjene.



Slika 7. Bayerov proces [35]

Nakon završetka Bayerovog procesa, dobiveni aluminijski hidroksid ili aluminijski oksid može se dalje koristiti u proizvodnji primarnog aluminija putem Hall-Héroultovog elektrolitičkog procesa, slika 8, pri čemu se aluminijski oksid ili aluminijski hidroksid rastopi u posebnom elektrolitu koji se sastoji od kriolita (aluminijev fluorid) i drugih spojeva.



Slika 8. Hall-Héroultov proces [36]

Elektrolitička ćelija sastoji se od anoda i katoda, a prilikom elektrolize električna struja se provodi kroz elektrolit. Na anodi, koja je obično izrađena od ugljika, javlja se oksidacija i stvaranje kisika. Na katodi, koja je također izrađena od ugljika, javlja se redukcija aluminijskih iona, što rezultira taloženjem aluminija na dnu ćelije. Istaloženi metal redovito se uklanja iz elektrolitičke ćelije i ima visoku čistoću, obično iznad 99%.

Nakon što je primarni aluminij proizveden, može se dalje preraditi i oblikovati prema potrebama. Ovaj postupak uključuje lijevanje, valjanje, ekstruziju ili druge oblike obrade kako bi se dobili različiti oblici aluminijskih proizvoda, kao što su razni odljevci, ploče, limovi, šipke, cijevi, profili i drugi.

- Lijevanje

Tekući aluminij se ulijeva u kalupe kako bi se stvorile nove limenke ili drugi aluminijski proizvodi. Kalupi mogu imati različite oblike i veličine prema željenom konačnom proizvodu.

- Valjanje

Alternativno, tekući aluminij se može prešati između valjaka kako bi se dobile aluminijske ploče ili trake različitih debljina. Ove ploče se često koriste u industriji za izradu limova, limenki ili drugih aluminijskih proizvoda

- Ekstruzija

Ova metoda se koristi kada se želi oblikovati aluminij u specifične profile ili cijevi. Tekući aluminij se potiskuje kroz kalup s odgovarajućim otvorima i oblikuje u željeni oblik. Ovaj postupak omogućuje proizvodnju različitih aluminijskih profila koji se često koriste u građevinskoj industriji ili za izradu okvira i konstrukcija.

Nakon oblikovanja, aluminijski proizvodi se mogu podvrgnuti dodatnoj obradi, kao što je eloksiranje (anodizacija), bojenje, brušenje ili poliranje, kako bi se poboljšale njihove estetske i funkcionalne karakteristike.

Primarni proces proizvodnje aluminijske legure, koji uključuje Bayerov proces i Hall-Héroultov elektrolitički proces, zahtijeva velike količine energije i resursa, uključujući električnu energiju i sirovine poput boksita. Stoga se kontinuirano istražuju i primjenjuju inovacije kako bi se smanjila potrošnja energije i resursa u proizvodnji aluminijske legure. Važno je napomenuti da primarni proces proizvodnje aluminijske legure ima značajan utjecaj na okoliš. Uz veliku potrošnju energije Bayerov i Hall-Héroultov proces emitiraju plinove kao što su ugljični dioksid, ugljični monoksid i sumporov dioksid koji pridonose globalnom zagrijavanju. Također, postoji i potencijal za onečišćenje vode i tla, posebno tijekom eksploatacije boksita i korištenja kemikalija u procesu. Osim navedenog, znatne su i količine otpada koji nastaje u procesu. Elektrolitički talog, poznatiji kao crveni mulj, koji se uklanja s dna ćelije može sadržavati tragove štetnih tvari poput fluorida i drugih spojeva. Stoga se provode postupci za pravilno odlaganje i obradu ovog otpada kako bi se minimizirao utjecaj na okoliš [24, 34].

Kako bi se smanjio utjecaj na okoliš, industrija stalno radi na razvoju održivih praksi u proizvodnji aluminijske legure. To uključuje upotrebu obnovljive energije, optimizaciju procesa kako bi se smanjila potrošnja energije i sirovina te implementaciju mjera za zaštitu okoliša, kao što su postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda i smanjenje emisija štetnih plinova. Primarni proces proizvodnje aluminijske legure, koji uključuje navedene procese, omogućuje dobivanje visokokvalitetnog aluminijske legure iz boksita, a u kombinaciji s recikliranjem aluminijske legure, može se postići održiva proizvodnja i korištenje ovog važnog materijala [26, 34, 37, 38].

3.3. Sekundarna proizvodnja aluminijske legure

Sekundarna proizvodnja aluminijske legure odnosi se na proces recikliranja otpadnog aluminijske legure radi dobivanja novog proizvoda. S obzirom na znatne količine energije i resursa potrebne za proizvodnju aluminijske legure primarnim postupkom, sekundarni proces proizvodnje aluminijske legure ima važnu ulogu u održivom kružnom gospodarstvu jer smanjuje potrebu za primarnom proizvodnjom aluminijske legure, štedi energiju i resurse te smanjuje negativan utjecaj na okoliš [39].

3.3.1. Proces recikliranja aluminija i aluminijskih legura

Proces recikliranja aluminija i aluminijskih legura uključuje nekoliko koraka koji omogućuju pretvaranje otpadnog aluminija u novi korisni materijal.

Prvi korak u procesu recikliranja je prikupljanje otpadnog aluminija koji može potjecati iz različitih izvora, kao što su aluminijske limenke, konstrukcijski materijali, dijelovi vozila, elektronika i drugi proizvodi. Prikupljanje se može provoditi putem sustava za recikliranje, kontejnera za odlaganje ili prikupljanja na određenim lokacijama.

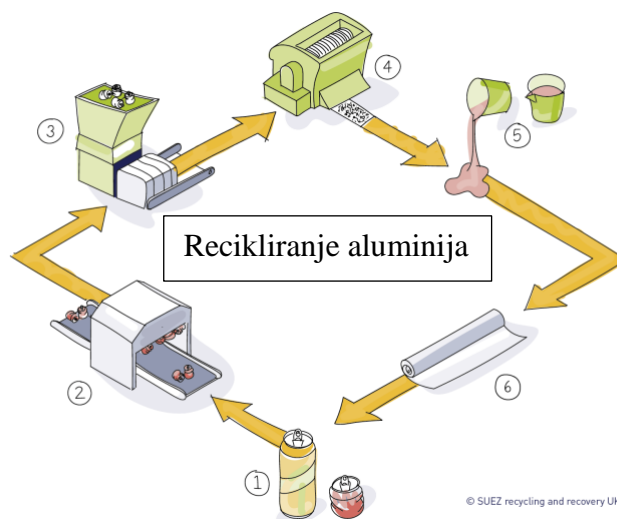
Nakon prikupljanja, otpadni aluminij se sortira kako bi se odvojio od ostalih materijala. U ovom koraku, limenke se razdvajaju od drugih aluminijskih proizvoda, kao i od drugih materijala poput plastike, stakla i papira. Sortiranje se može provesti ručno ili pomoću automatskih sortirnih sustava koji koriste tehnologiju magnetskog odvajanja ili optičkog prepoznavanja. Nakon sortiranja, otpadni aluminij se drobi i usitnjava kako bi se smanjila veličina materijala. Ovo može uključivati upotrebu drobilica, mlinova ili granulatora. Cilj ovog koraka je pretvoriti otpadni aluminij u manje komade koji su pogodni za daljnju obradu taljenjem [34].

Taljenje se obično provodi u posebnim pećima ili visokotlačnim spremnicima pod kontroliranim uvjetima temperature i atmosfere. U ovom koraku se dodaju određene legure ili aditivi kako bi se postigao željeni kemijski sastav i svojstva aluminija. Nakon taljenja, tekući aluminijski materijal prolazi kroz proces pročišćavanja kako bi se uklonile nečistoće i legure koje mogu biti prisutne. Filtracija, dezoksidacija, elektrostatska separacija ili druge tehnike pročišćavanja mogu se koristiti za postizanje visoke čistoće recikliranog aluminija [34].

Nakon recikliranja, obrade taline i eventualnog legiranja dobiva se talina koja se zatim može oblikovati lijevanjem u gotove proizvode ili lijeva u ingote radi daljnje prerade taljenjem ili plastičnim oblikovanjem. To može uključivati lijevanje u kalupe za izradu limova, cijevi, profila ili drugih oblika, kao i ekstruziju za dobivanje složenijih oblika. Daljnja obrada, poput valjanja, rezanja, brušenja, bušenja ili zavarivanja, može se provesti kako bi se postigle željene dimenzije i konačni oblik proizvoda.

Konačni reciklirani aluminijski proizvodi mogu se koristiti u različitim industrijskim sektorima, uključujući građevinarstvo, automobilsku industriju, ambalažu, elektroniku i druge. Reciklirani aluminij se može koristiti za proizvodnju novih aluminijskih proizvoda, kao i za obnavljanje postojećih proizvoda kroz popravke ili obnove [4, 34].

Da bi se potaknulo recikliranje aluminija, mnoge države fokus su stavile na aluminijske limenke, te nude povrat novca ili druge povlastice za vraćanje limenki na mjesta za prikupljanje povratne ambalaže. Nakon što se limenke vrate, one se transportiraju do postrojenja za recikliranje, prilikom čega prolaze kroz iste postupke koji su već opisani - sortiranje, pranje, drobljenje, taljenje, čišćenje, rafiniranje i oblikovanje, slika 9 [40].



Slika 9. Proces recikliranja aluminijskih limenki [41]

Aluminijske limenke su izuzetno pogodne za recikliranje jer se mogu reciklirati s visokom učinkovitošću. Otprilike 75% svih proizvedenih aluminijskih limenki u svijetu se reciklira. To je značajno veća stopa recikliranja u usporedbi s drugim vrstama ambalaže poput staklenih ili plastičnih boca [42].

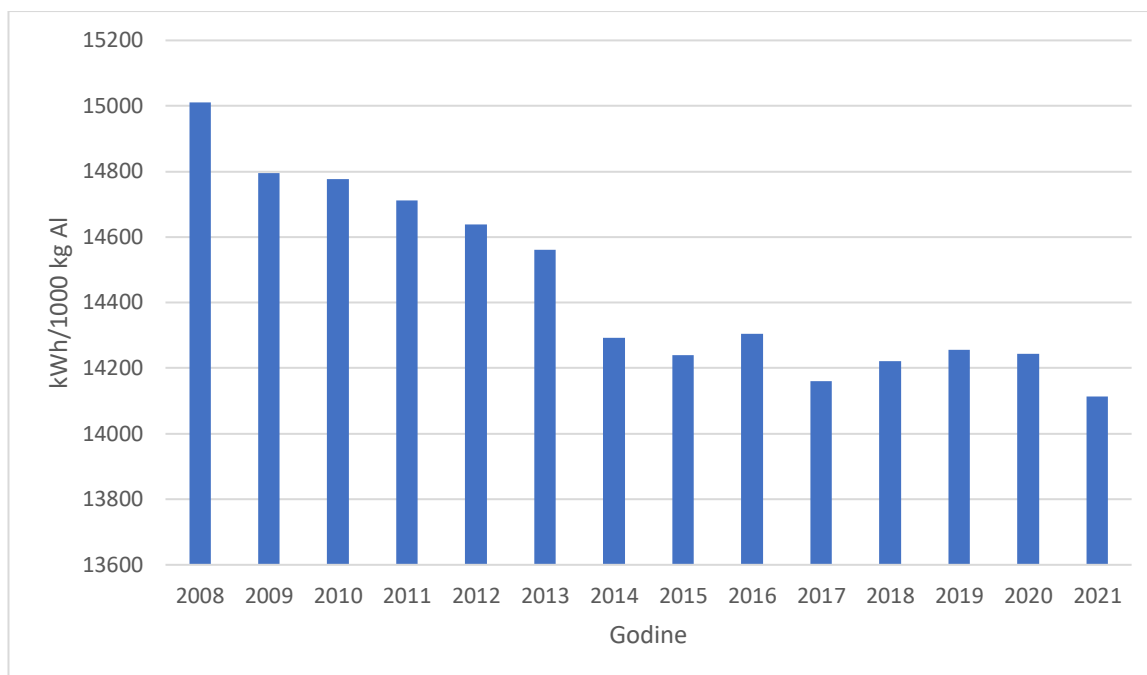
Postupak recikliranja aluminijskih limenki je relativno brz i jednostavan. Od sakupljanja limenki do stvaranja novih proizvoda može proći vrlo kratko vrijeme, a to omogućava brzu obnovu resursa i smanjuje potrebu za proizvodnjom primarnog aluminija. Recikliranje aluminijskih limenki omogućava značajnu uštedu energije u usporedbi s proizvodnjom primarnog aluminija. Prema procjenama, utrošak energije potrebne za recikliranje aluminija je znatno manji od energije koja je potrebna za proizvodnju jednake količine primarno proizvedenog aluminija [2, 40].

Recikliranje aluminijskih limenki potiče potrošačku svijest o održivosti i uporabi. Podizanjem svjesnosti o važnosti recikliranja i aktivnim sudjelovanjem u procesu, postizao bi se još veći uspjeh u očuvanju prirodnih resursa [2, 43].

3.4. Aluminij u kružnom gospodarstvu

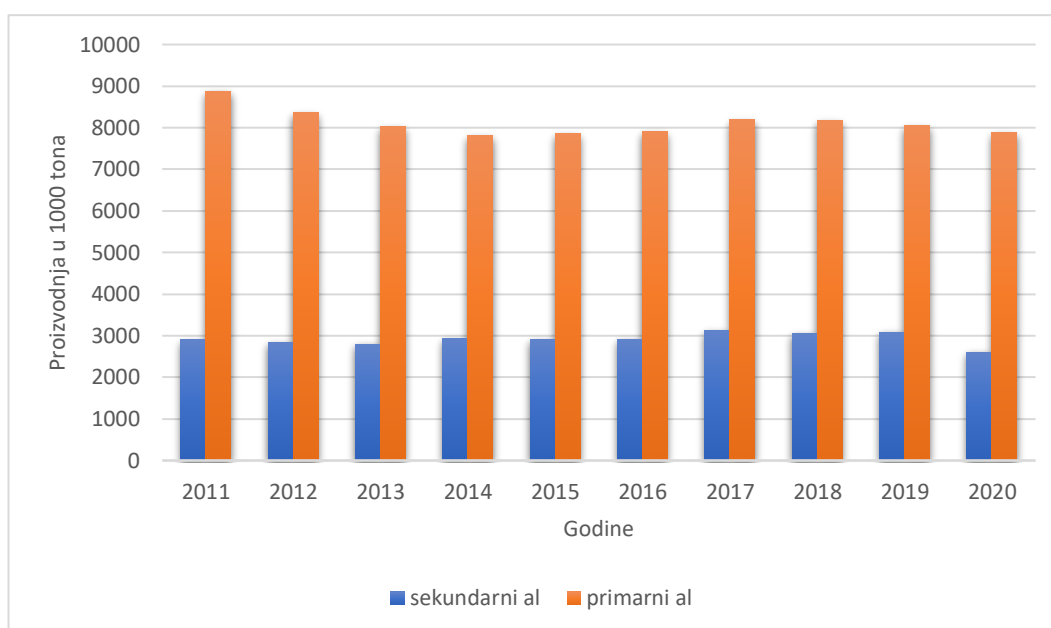
Aluminij je iznimno reciklabilan materijal. Pokazatelji ukazuju da se može reciklirati bez gubitka kvalitete i svojstava. Postupak recikliranja aluminija zahtijeva puno manje energije u odnosu na izradu aluminija iz primarnih sirovina, a može se koristiti za proizvodnju novih proizvoda bez potrebe za ekstrakcijom novih sirovina. Aluminij igra važnu ulogu u smanjenju otpada i očuvanju resursa. To smanjuje ekološki otisak i produžuje životni vijek aluminija kao resursa. Kroz kružno gospodarstvo, aluminij se može koristiti u dugotrajnim proizvodima, a nakon njihovog isteka roka trajanja, može se reciklirati i koristiti za proizvodnju novih proizvoda.

Prema nekim izvorima, potrošnja energije potrebne za recikliranje aluminija iznosi oko 5% u usporedbi s primarnom proizvodnjom iz boksita [42]. Slika 10 prikazuje ukupnu potrošnju energije pri proizvodnji primarnog aluminija.



Slika 10. Energija potrebna za proizvodnju primarnog aluminija (kWh/1000 kg Al) [44]

Iako je iz grafa jasno vidljivo da je prihvatljivije reciklirati aluminij, značajno je manja proizvodnja sekundarnog aluminija, slika 11.



Slika 11. Usporedba proizvodnje primarnog i sekundarnog aluminija [44]

Smanjenje potrošnje energije tijekom sekundarne proizvodnje aluminija pridonosi smanjenju emisija stakleničkih plinova i očuvanju prirodnih resursa [42].

Kružno gospodarstvo aluminija stvara nove poslovne prilike u sektoru recikliranja i prerade. Reciklažne industrije mogu prikupljati, sortirati i reciklirati aluminij te ga prodavati kao sekundarnu sirovinu proizvođačima. Ovo otvara mogućnosti za razvoj lokalnih industrija i stvaranje radnih mjesta vezanih uz recikliranje i preradu aluminija.

Treba naglasiti kako proces proizvodnje primarnog aluminija, uz veliku potrošnju energenata, zahtijeva i velike količine vode. Recikliranje aluminija zahtijeva značajno manje vode u usporedbi s proizvodnjom primarnog aluminija. Smanjenje potrebe za vodom u proizvodnom procesu aluminija smanjuje pritisak na vodne resurse i pomaže u očuvanju vodnih ekosustava [45].

Recikliranje aluminija smanjuje ovisnost o uvozu primarnih sirovina. Mnoge zemlje ovise o uvozu boksita i drugih sirovina potrebnih za proizvodnju primarnog aluminija. Kroz recikliranje aluminija, zemlje mogu smanjiti svoju ovisnost o uvozu sirovina i osloniti se na domaće zalihe recikliranog aluminija. Iako je reciklirani aluminij bolji za okoliš, može sadržavati primjese iz recikliranog materijala, a primarni aluminij ima visoku čistoću i kvalitetu. Iz tog razloga u određenim granama industrije, gdje primjese stvaraju probleme, i dalje je potrebno korištenje Al iz primarne proizvodnje, te ju time nije moguće u potpunosti eliminirati. S ekonomskog stajališta primarna proizvodnja zahtijeva značajna ulaganja u rudnike, preradu ruda, postrojenja, te infrastrukturu, dok sekundarna proizvodnja može biti vrlo isplativa jer se koriste već prerađeni materijali.

Ukupno gledano, sekundarna proizvodnja aluminija kroz recikliranje ima prednosti u smislu smanjenja utjecaja na okoliš, smanjenja potrošnje energije i očuvanja resursa. Međutim, primarna proizvodnja aluminija još uvijek igra važnu ulogu u zadovoljavanju rastuće potražnje za aluminijem, posebno za visokokvalitetnim aluminijskim proizvodima. Stoga je važno da se primarna i sekundarna proizvodnja kombiniraju kako bi se postigla ravnoteža između održivosti i zadovoljenja potreba tržišta.

U današnje vrijeme, s napretkom civilizacije, stvara se potreba za dostupnošću hrane koja se pakira u praktične ambalaže. Jedan od primjera ambalaže su limenke za pohranu pića napravljene od aluminija. Veliku količinu ljudskog otpada čine aluminijske limenke koje su izvrstan sekundarni izvor sirovina za proizvodnju aluminija i odličan primjer kružnog gospodarstva [2, 43]. Jedan takav primjer oporabe odvija se u talionici i ljevaonici aluminija tvrtka CIAL d.o.o.

3.5. Oporaba aluminijske ambalaže u tvrtki CIAL d.o.o.

Tvrtka CIAL d.o.o. je talionica i ljevaonica koja se primarno fokusirala na recikliranje aluminijskog otpada, slika 12.



Slika 12. Aluminijski otpad

Kao sirovinu za proizvodnju aluminijskih legura koriste različite vrste aluminijskog otpada koji služi kao sirovina za taljenje, rafiniranje i lijevanje aluminija i njegovih legura. Iako se koriste razni izvori aluminijskog otpada, najveći udio čine aluminijske limenke, slika 13, na koje imaju koncesiju 10 godina.



Slika 13. Sprešana povratna ambalaža

Postrojenje (CIAL d.o.o.) za dobivanje aluminija recikliranjem sastoji se od sljedeće opreme:

- šaržnih kolica-uređaj za šaržiranje/punjenje sirovine u rotacijsku nagibnu peć (KTO) upravljano iz kontrolne kabine,
- rotacijske nagibne peći (KTO) opremljene s oxy-fuel nagibnim gorionikom,
- karusela za proizvodnju blokova,
- peći za održavanje temperature i legiranje (holding peći, WHO peći),
- linije za lijevanje,
- automatske linije za slaganje buntova s poluautomatskim uređajem za vezanje buntova i
- filtarskog postrojenja s automatskim doziranjem vapna i aktivnog koksa.

Aluminijski otpad dolazi u različitim oblicima i dimenzijama pa ga u prvoj fazi treba pripremiti za daljnju obradu. Budući da se najveći dio aluminijskog otpada koji dolazi u CIAL d.o.o. sastoji od povratne ambalaže u kojoj može biti i limenki koje nisu od aluminija, veliki sprešani blokovi se usitnjavaju u tzv. šrederima, slika 14, pri čemu se vrši odvajanje željezne ambalaže magnetskom separacijom.



Slika 14. Šreder s magnetskim separatorom

Pripremljeni materijal se prije taljenja najprije uzorkuje. Uzima se reprezentativni uzorak po kojem se određuju nemetalne nečistoće i sadržaj vlage, jer može doći do teških oštećenja na uređaju i pogoršanja iskoristivosti metala.

Rotacijska nagibna peć (KTO 10), slika 15, tali isključivo aluminij u obliku strugotina, mljevenog otpada i komada otpada određenih dimenzija.



Slika 15. Rotacijska nagibna peć

Uređaj se sastoji od zakretne rotacijske peći, sustava za mjerenje sastava dimnog plina i regulacijskog sustava za zemni plin i kisik te stroja za punjenje peći. Međutim, ako je došlo do zastoja u tom dijelu, da se ne bi zaustavio i proces taljenja u KTO, rastaljeni aluminij se lijeva u rotacijske kalupe (karusel), slika 16, a dobiveni odljevci se naknadno ponovno vraćaju u proces proizvodnje.



Slika 16. Rotacijski kalupi (karusel)

Nakon taljenja u rotacijskoj nagibnoj peći rastaljeni aluminij se kanalom prebacuje u peć za legiranje i održavanje taline (WHO 27), slika 17, na daljnju obradu i dolegiravanje.



Slika 17. Peć za legiranje i održavanje taline

Peć za legiranje i održavanje taline (WHO 27) sastoji se od peći za održavanje topline, uređaja za mjerenje sastava dimnog plina, uređaja za doziranje zemnog plina i zraka te uređaja za propuhivanje inertnim plinom.

Peć ima kapacitet od 27 tona legure te je opremljena regenerativnim gorionicima visokog učinka uz minimalnu emisiju CO₂. Peć se može hidraulički podizati i spuštati, a vrata peći se također hidraulički otvaraju i zatvaraju. Prilikom punjenja peći ona se mora nalaziti u spuštenom položaju. Puni se kroz otvor za punjenje na stražnjoj strani, pri čemu temperatura unutar peći mora iznositi najmanje 850 °C, a vrata peći moraju biti zatvorena.

Nakon završne kontrole sastava aluminijska talina se izljeva u blokove mase 6-8 kg. Uređaj za slaganje blokova sastoji se od transportne trake koja s ljevačke trake preuzima blokove i usmjerava ih u skladu s njihovim položajem na hrpi te podizne grede koja preuzima gotove hrpe s transportne trake i dalje ih transportira do položaja u kojem ih preuzima viličar. Dio blokova je strogo kontroliranog sastava koji se kasnije koriste u ciljanoj proizvodnji, a dio blokova, koji nije dolegiravan, koristi se za dezoksidaciju pri proizvodnji čelika zbog velikog afiniteta aluminijska prema kisiku.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu provodila su se ispitivanja mehaničkih svojstava i analiza strukture dvije kvalitete ingota.

Prva kvaliteta, slika 18, je nakon recikliranja bez legiranja. Zbog visokog udjela aluminija koristi se za dezoksidaciju čelika u čeličanama ili za naknadnu doradu.



Slika 18. Početni izgled uzorka prve kvalitete

Druga kvaliteta, slika 19, je dobivena nakon obrade taline i dodavanja odgovarajućih legirajućih elemenata kako bi se dobio točno kontrolirani sastav.



Slika 19. Početni izgled uzorka druge kvalitete

Na uzorcima je provedena kemijska analiza na optičkom spektrometru SPECTROMAXx-u, slika 20.



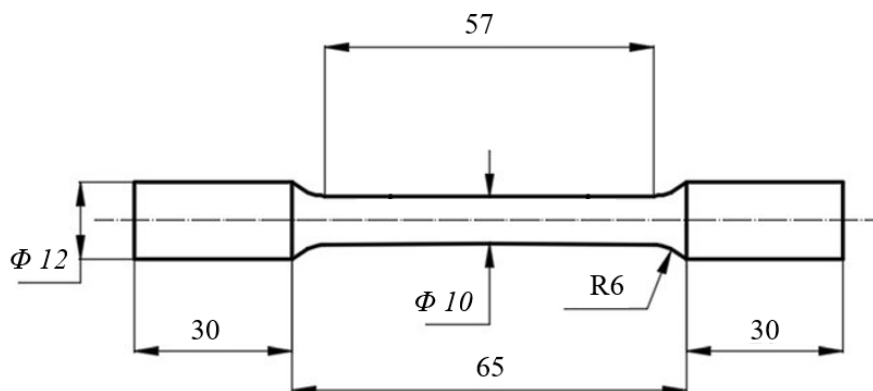
Slika 20. Spektrometar SPECTROMAXx

4.1. Statičko vlačno ispitivanje

Iz uzetih odljevaka CNC obradom izrađeni su uzorci okruglog poprečnog presjeka, slika 21, prema dimenzijama danim slikom 22.



Slika 21. Uzorci okruglog poprečnog presjeka



Slika 22. Prikaz standardne ispitne epruvete

Ispitivanja na uzorcima provedena su na kidalici Hegewald & Peschke Inspekt table 100, slika 23. Ispitivanja su provedena prema normi HR EN 6892-1 B metodi.



Slika 23. Kidalica Hegewald & Peschke Inspekt table 100

Za analizu podataka dobivenih statičkim vlačnim ispitivanjem korišten je programski paket LabMaster.

4.2. Strukturna ispitivanja

Uzorci za strukturna ispitivanja izrezani su iz početnih kvaliteta ingota po poprečnom presjeku, slika 24.



Slika 24. Izrezani uzorci iz ingota

Uzorci su zaliveni u kemijski vezivu masu i ručno pripremani na uređaju STRUERS Tegramin 30, slika 25.



Slika 25. STRUERS Tegramin 30

Brušenje i poliranje provedeno je prema sljedećem redosljedu:

- Brušenje na SiC 320 – 2 min
- LARGO DIA DUO 2 9 μ m – 3 min
- LARGO DIA DUO 2 3 μ m – 3 min
- CHEM OP-U 0,04 μ m – 2 min

Pripremljeni uzorci su nagrizani u Keller otopini. Keller otopina se sastojala od jednog volumnog udjela fluorovodične kiseline, 1,5 volumnih udjela klorovodične kiseline, 2,5 volumna udjela dušične kiseline i 95 volumnih udjela vode. Vrijeme nagrizanja je bilo 10-20 sekundi.

Mikrostruktura analiziranih uzoraka snimane su na metalografskom mikroskopu Olympus GX51 s digitalnom kamerom DP 27, slika 26.



Slika 26. Metalografski mikroskop Olympus GX 51 s digitalnom kamerom DP 27

4.3. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće provedeno je Vickersovom metodom uređajem Mitutoyo Hardness Testing Machine HV, slika 27.



Slika 27. Vickersov tvrdomjer

Odabrani parametri ispitivanja su opterećenje HV10 i vrijeme utiskivanja 10 s. Prije ispitivanja uređaj je nuliran i provedena je provjera točnosti očitavanja na etalonu. Nakon toga mjerene su vrijednosti tvrdoće. Rezultati su dani u dijelu Rezultati i rasprava.

5. REZULTATI I RASPRAVA

5.1. Rezultati kemijskog sastava na spektrometru SPECTROMAXx

Rezultati analize kemijskog sastava prikazani su tablicom 1.

Tablica 1. Rezultati analize kemijskog sastava

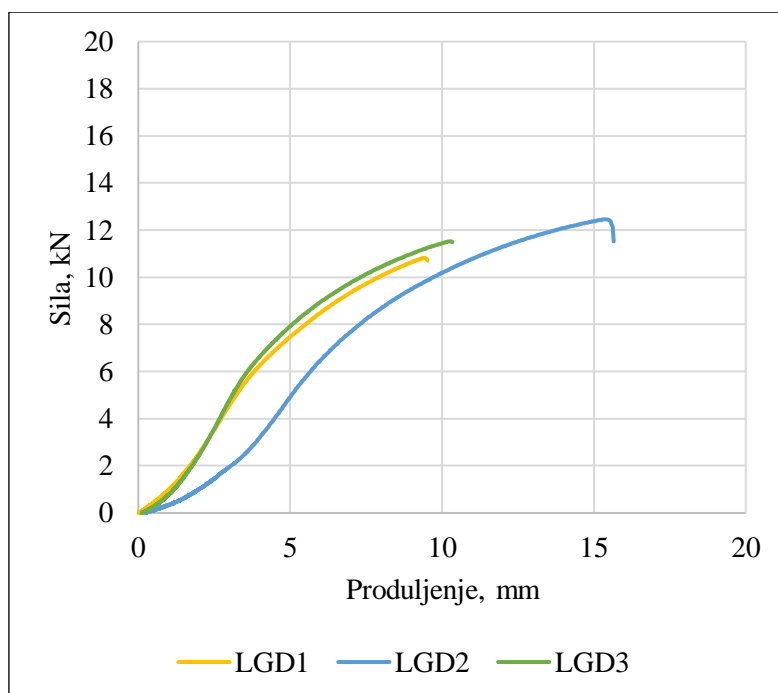
Legura	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Al
AlSi9Cu3(Fe)	10,45	0,69	2,35	0,5	0,249	0,019	0,025	0,71	<84,9
Dezox	0,266	0,57	0,172	0,84	0,465	0,02	0,007	0,06	>97,5

Iz rezultata analize kemijskog sastava vidljivo je kako nakon primarnog taljenja uloška, dobivena talina ima vrlo visok udio čistog aluminija (iznad 97,5%), stoga je pogodna za daljnju obradu legiranjem. Daljnja obrada je vođena dodatkom talitelja i legirajućih elemenata kako bi se postigla AlSi9Cu3(Fe) legura. Iz kemijskog sastava vidljivo je da dobivena legura odgovara normom propisanom kemijskom sastavu. U odnosu na polaznu talinu uočava se porast u sastavu Si, Cu i Zn.

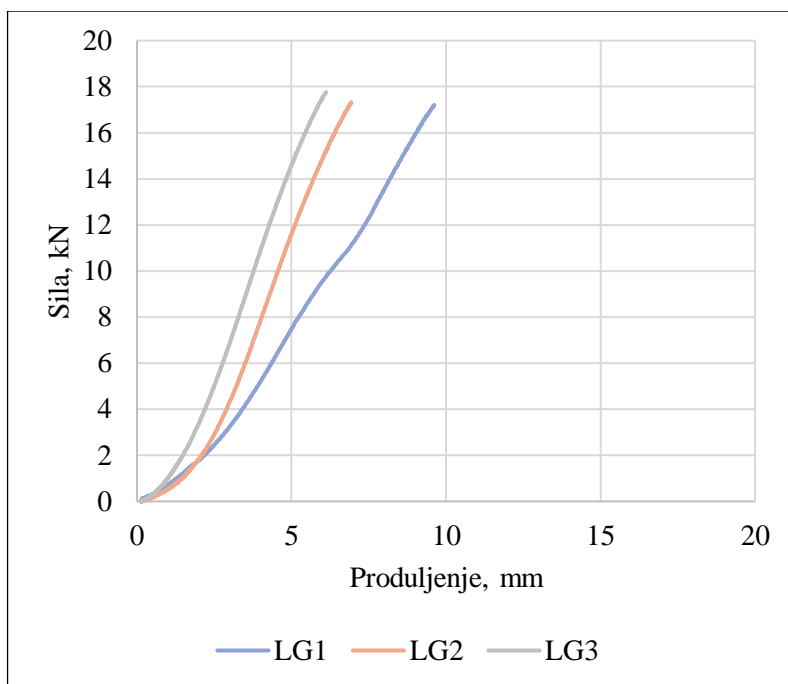
5.2. Rezultati mehaničkih ispitivanja

Rezultati statičkog vlačnog pokusa dani su dijagramima, slike 28 i 29, i tablicom 2.

Reciklirani nelegirani uzorci označeni su oznakom LGD, a nakon legiranja označeni su oznakom LG.



Slika 28. Dijagrami sila-produljenje nelegiranog recikliranog Al



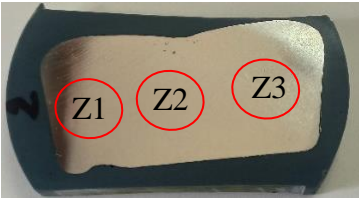
Slika 29. Dijagrami sila-produljenje legure AlSi9Cu3(Fe)

Tablica 2. Rezultati statičkog vlačnog pokusa

UZORAK	L ₀ , mm	d ₀ , mm	L _k , mm	d _k , mm	A, %	Z, %	R _m , MPa
LG1	50,8	9,95	51,13	9,88	0,65	1,40	221,34
LG2	50,9	10	51,06	9,91	0,31	1,79	220,59
LG3	54,24	9,95	55,27	9,9	1,90	1,00	228,45
LGD1	50,7	10	52,79	9,51	4,12	9,56	137,89
LGD2	50,7	10	55,64	9,2	9,74	15,36	158,71
LGD3	52,71	9,96	57,02	9,18	8,18	15,05	147,98

Odmah je uočljivo iz dijagrama statičkog vlačnog pokusa da se radi o vrlo različitim materijalima. Reciklirani Al bez naknadne obrade ima izražena plastična svojstva, vlačne čvrstoće 130 – 160 MPa, i istežljivosti 5 – 10 %, te kontrakcije 10 – 15 %. Nakon obrade taline i dodatkom legirajućih elemenata uočava se pad u plastičnosti dobivene legure, a istežanje i kontrakcija su ispod 2%. S druge strane raste vlačna čvrstoća i iznosi 220 – 230 MPa. Rezultati mjerenja tvrdoće prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće

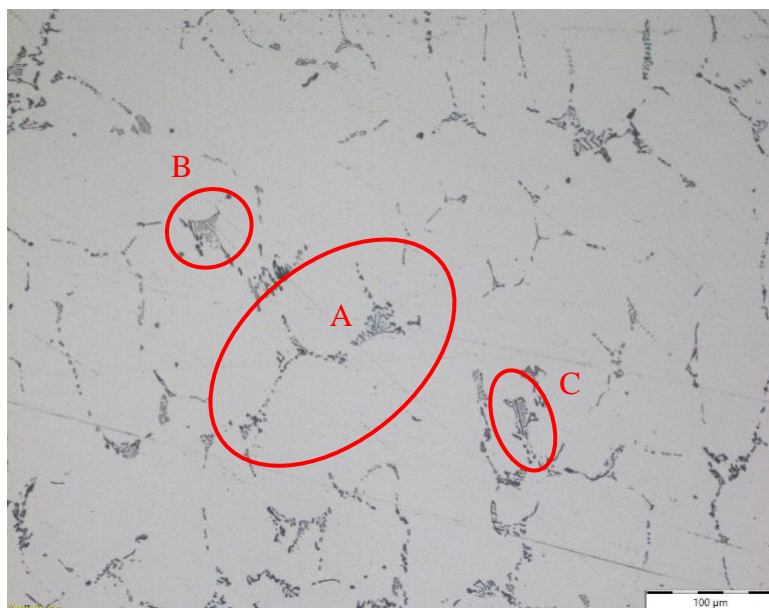
			
Pozicije mjerenja tvrdoće HV10			
Nelegirani (dezoX)		Legura (AlSi9Cu3(Fe))	
Z1	53,4	Z1	110,8
	53,5		108,8
	51,3		102,4
	34,1		109,1
	57,5		113,3
	53,6		110
Z2	56,8	Z2	99,5
	51,8		99,1
	36,9		102,2
	52,3		104,7
	52,8		103,3
	50,4		107,1
Z3	53,5	Z3	100,4
	51,6		108,2
	46,7		110,2
	52,2		107,2
	55,9		110,6
	58,3		111

Izmjerene vrijednosti tvrdoće prate rezultate statičkog vlačnog pokusa. Uočava se značajni porast u izmjerenim vrijednostima tvrdoće Al legure nakon dodatka legirajućih elemenata. Tvrdoća je mjerena na tri pozicije kako bi se utvrdilo postoji li razlika u vrijednostima tvrdoće po presjeku.

Ustanovljeno je kako ne postoji razlika po presjeku. Prosječna vrijednost izmjerenih tvrdoća čistog recikliranog Al iznosila je 51,25 HV, dok je dodatkom legirajućih elemenata porasla na 106,55 HV, što je preko 100% u porastu tvrdoće.

5.3. Rezultati metalografske analize

Rezultati metalografske analize čistog aluminija nakon taljenja i rafinacije taline prikazani su slikom 30 i slikom 31.



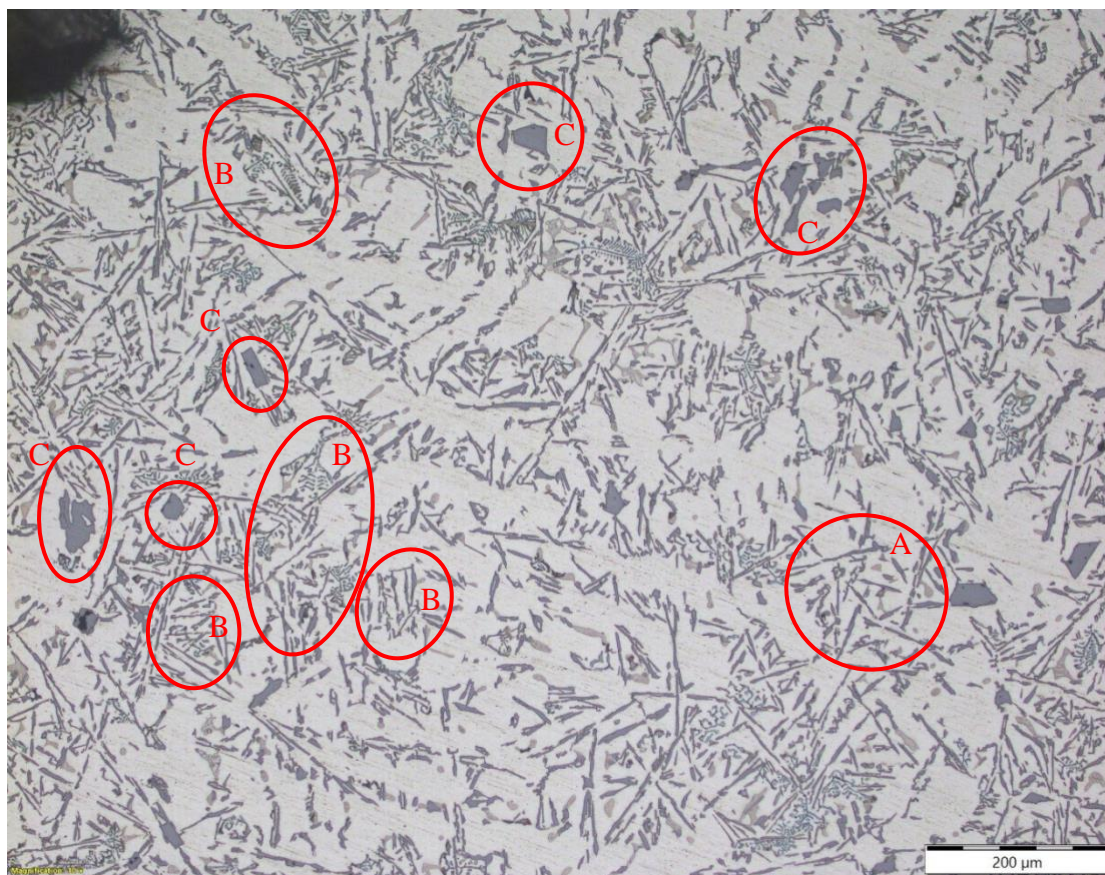
Slika 30. Nelegirani (dezox) Al pri povećanju 200x



Slika 31. Nelegirani (dezox) Al pri povećanju 500x

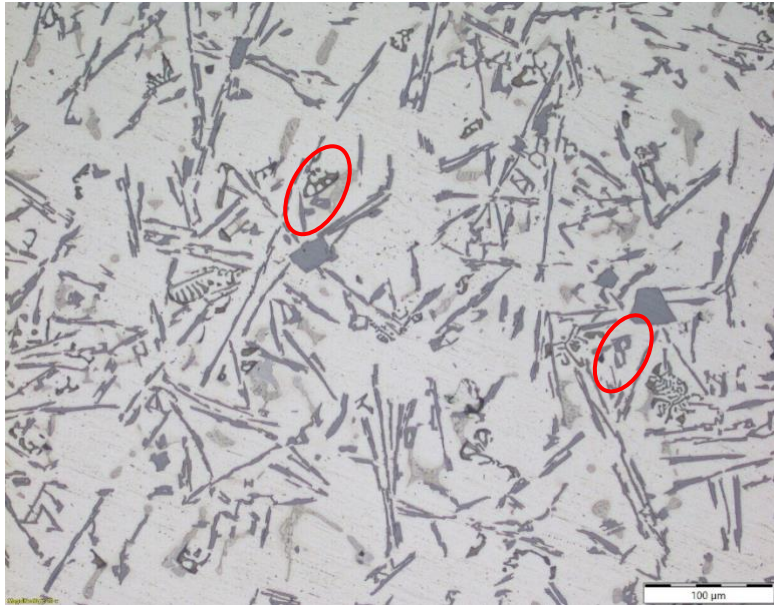
Metalografija je pokazala kako se radi o tipičnom lijevanom aluminiju s primarnim α_{Al} izlučenim u obliku dendritne mreže s intermetalnim fazama u intermetalnom području (slika 30 A). Obzirom na nizak udio legirajućih elemenata, od prisutnih intermetalnih faza na temelju morfologije moguće je samo istaknuti prisutnost $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ (slika 30 B i slika 30 C). Usljed prisutnosti bakra i ostalih elemenata u talini utvrđena je prisutnost Al_2Cu (slika 31 A) i $Al_5Mg_8Si_6Cu_2$ (slika 31 B) faza.

Slikama 32 – 34 prikazana je mikrostruktura uzoraka recikliranog Al nakon dodatka legirajućih elemenata i obrade taline taliteljima.



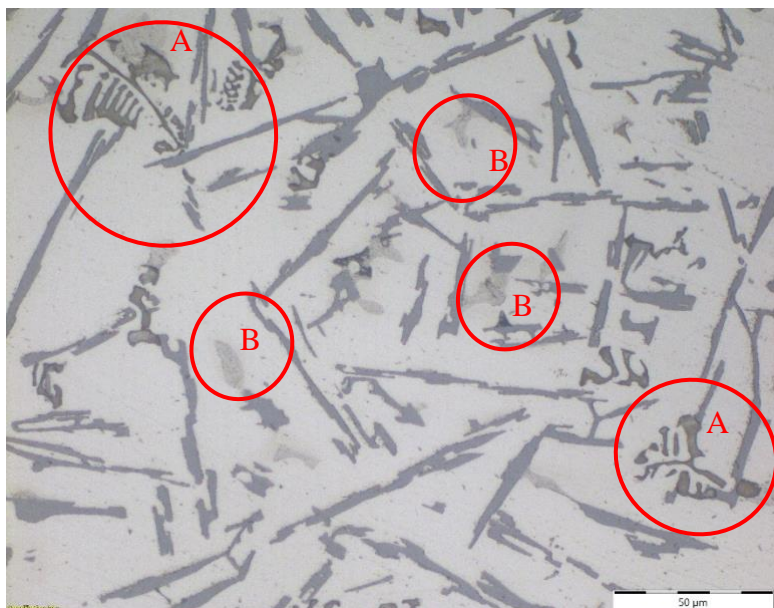
Slika 32. Dolegirani Al pri povećanju 100x

Nakon legiranja mikrostruktorna analiza pokazuje da je metalna osnova i dalje dendritna mreža primarnog α_{Al} , no zbog povećanja sadržaja legirajućih elemenata Si, Cu i Zn, uočavaju se i ostali mikrostrukturni konstituenti u intermetalnom području. Uslijed povećanja sadržaja Si dolazi do izdvajanja primarnog β_{Si} (slika 32 C) pločaste morfologije, kao i nemodificiranog eutektika ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$) lamelarne morfologije. Uočena morfologija legure objašnjava nedostatak plastičnosti i porast tvrdoće izmjerenih pri ispitivanju mehaničkih svojstava ovih talina. Uz navedeno, uočena je formirana $Al_5Mg_8Si_6Cu_2$ intermetalna faza (slika 33).



Slika 33. Dolegirani Al pri povečanju 200 x

Pored navedenoga, između dendritnih grana primarnog α_{Al} uočavaju se intermetalne faze $Al_{15}(Mn,Fe)_3Si_2$ morfologije kineskog pisma (slika 34 A) te Al_2Cu grozdaste morfologije.



Slika 34. Dolegirani Al pri povečanju 500X

6. ZAKLJUČAK

Primarna proizvodnja aluminija zahtijeva značajna ulaganja u rudnike, preradu ruda, u postrojenja i infrastrukturu, uz značajan utjecaj na okoliš. Uz iskorištavanje prirodnih resursa, nakon eksploatacije i prerade boksita kao primarne sirovine, ostaju značajne količine tzv. crvenog mulja koji predstavlja opasni tehnološki otpad.

S druge strane, recikliranje aluminija iz povratne ambalaže isplativ je proces, kojim ne samo da smanjujemo količinu nastalog otpada, već smanjujemo emisiju onečišćujućih dimnih plinova i potrošnju energije. Prema statističkim podacima, potrošnja energije se smanjuje i do 95% od one pri primarnoj proizvodnji aluminija.

U ovom radu provedena su mehanička, strukturna i kemijska ispitivanja u obje faze prerade aluminijских limenki. Uspoređujući kvalitetu taline nakon prve i druge faze prerade aluminija dobivenog iz limenki uočene su određene razlike u mehaničkim svojstvima i strukturi talina.

Reciklirani Al bez naknadne obrade ima izražena plastična svojstva, nižu vlačnu čvrstoću, veću istezljivost i kontrakciju, dok legirani uzorak pokazuje znatan pad u plastičnosti, istezljivosti i kontrakciji, ali i veliki rast vlačne čvrstoće.

Nakon prve faze taljenja se ostvaruje relativno čista Al talina, pogodna za daljnju obradu legiranjem. Metalografija je pokazala kako se radi o tipičnom lijevanom aluminiju s primarnim α_{Al} izlučenim u obliku dendritne mreže.

Nakon rafinacije i legiranja proizvedena je talina kvalitete $AlSi_9Cu_3(Fe)$. Nakon provedene metalografske analize uočene su promjene u morfologiji između analiziranih uzoraka, koje objašnjavaju nedostatak plastičnosti i porast tvrdoće izmjerenih pri ispitivanju mehaničkih svojstava kod odljevka dobivenog legiranjem.

U strukturi uočava se krhki primarni β_{Si} i nemođificirani eutektik ($\alpha_{Al} + \beta_{Si}$), što objašnjava lošiju plastičnost i povećanje tvrdoće u odnosu na početnu talinu nakon recikliranja.

7. LITERATURA

- [1] <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/economy/20151201STO05603/kruzno-gospodarstvo-definicija-i-koristi-koje-donosi> (07.05.2023.)
- [2] R. Stewart, M. Niero, K. Murdock, S.I. Olsen, Exploring the Implementation of a Circular Economy Strategy: The Case of a Closed-loop Supply of Aluminum Beverage Cans, *Procedia CIRP*, Volume 69, 2018, Pages 810-815
- [3] Joseph R. Davis, *Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM International, Jan 1, 1993 - Technology & Engineering, 784 pages
- [4] J. A. S. Green, *Aluminum Recycling and Processing for Energy Conservation and Sustainability*, ASM International, Ohio, 2007., 267 pages
- [5] D. Lazarevic, G. Finnveden, M. Brandão, *Handbook of the Circular Economy*, Edward Elgar Publishing, Mass UK, 2020.
- [6] S. K. Gosh, *Circular Economy: Global Perspective*, Springer, Kolkata, 2019.
- [7] <https://www.fzoeu.hr/hr/kruzno-gospodarstvo/7659> (01.06.2023.)
- [8] European Health and Digital Executive Agency, *A Circular Economy approach in the raw materials sector*, European Union, 2022.
- [9] C. Bakker, F. Wang, J. Huisman, M. Den Hollander, Products that go round: exploring product life extension through design, *Journal of Cleaner Production*, Volume 69, 2014, Pages 10-16
- [10] <https://ellenmacarthurfoundation.org> (05.06.2023.)
- [11] E. Suzanne, N. Absi, V. Borodin, Towards circular economy in production planning: Challenges and opportunities, *European Journal of Operational Research*, Volume 287, 2020, Pages 168-190
- [12] T. Schaubroeck, T. Gibon, E. Igos, E. Benetto, Sustainability assessment of circular economy over time: Modelling of finite and variable loops & impact distribution among related products, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 168, 2021.
- [13] M. Geissdoerfer, S. N. Morioka, M. Monteiro de Carvalho, S. Evans, Business models and supply chains for the circular economy, *Journal of Cleaner Production*, Volume 190, Pages 712-721
- [14] J. Delanoeije, K. Bachus, *Reuse: The understudied circular economy strategy*, HIVA-KU Leuven, 2020.
- [15] A. M. Ragossnig, D. R. Schneider, *Circular economy, recycling and end-of-waste*, *Waste Management & Research*, 2019
- [16] R. Jan, *Waste and circular economy: Deciphering green & sustainable challenges and opportunities of waste management*, Natixis, 2020.

- [17] https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits?&at_campaign=20234-Economy&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&at_audience=circular%20economy&at_topic=Circular_Economy&at_location=HR&gclid=CjwKCAjwq4imBhBQEiwA9Nx1Bi9ot-YIx5vhPtPCGA4zyqGuF3VX3UTA3wSQZAYKFjQjUaMqpuixMRoC3E8QAvD_BwE (19.06.2023.)
- [18] <https://www.glasgacke.hr/?ispis=detalji&novost=8639&kat=76> (19.06.2023.)
- [19] C. S. Brooks, *Metal Recovery from Waste*, CRC Press, Florida, 1991.
- [20] M. A. Reuter, A. van Schaik, J. Gutzmer, N. Bartie, A. Abadías-Llamas, Challenges of the Circular Economy: A Material, Metallurgical, and Product Design Perspective, *Annu. Rev. Mater. Res.*, Volume 49, Pages 253–74, 2019.
- [21] T. P. Makhathini, J. K. Bwapwa, S. Mtsweni, Various Options for Mining and Metallurgical Waste in the Circular Economy: A Review, *Sustainability*, A. A. Zorpas, 2023.
- [22] M. Meltzer, *Metal Bearing Waste Streams: Minimizing, Recycling and Treatment*, Elsevier Science, Norwick, 1980.
- [23] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1530> (20.06.2023.)
- [24] H. Kvande, P. A. Drabløs, The Aluminum Smelting Process and Innovative Alternative Technologies. *Journal of occupational and environmental medicine / American College of Occupational and Environmental Medicine*, Volume 56, Number 5S, Pages 23-31, 2014.
- [25] https://technologystudent.com/despro_3/aluminium1.html (21.06.2023.)
- [26] NPCS Board of Consultants & Engineers, *The Complete Technology Book on Aluminium and Aluminium Products*, Asia Pacific Business Press Inc., India, 2007.
- [27] D. S. MacKenzie, G. E. Totten, *Handbook of Aluminum, Volume 2: Alloy Production and Materials Manufacturing*, CRC Press, New York, 2003.
- [28] <https://www.clinecollisioncenter.com/are-cars-made-out-of-aluminum/> (20.06.2023.)
- [29] X. Sun, X. Han, C. Dong, X. Li, *Applications of Aluminum Alloys in Rail Transportation*, China, 2021.
- [30] P. A. Plunkert, E. D. Sehnke, *Aluminum, Bauxite & Alumina*, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1993.
- [31] <https://www.aluminiumleader.com> (20.06.2023)
- [32] <https://www.hydro.com/en-AT/aluminium/products/bauxite--alumina/bauxite/> (21.06.2023.)

- [33] S. J. Lindsay, *Light Metals 2011*, Springer International Publishing, Switzerland, 2011.
- [34] C. Schmitz, *Handbook of Aluminium Recycling*, Vulkan-Verlag, Germany, 2006.
- [35] D. D. Arhin, R. A. Nuamah, B. Agyel-Tuffour, D. Obada, *Awaso Bauxite Red Mud-Cement Based Composites: Characterisation for Pavement Applications*, Volume 7, Pages 45-55, Ghana, 2017.
- [36] <https://www.metallurgyfordummies.com/the-bayer-and-hall-heroult-process.html> (20.08.2023.)
- [37] American Chemical Society, *Production of Aluminum: The Hall-Hérout Process*, 1997.
- [38] P. Mandin, R. Wüthrich, H. Roustan, *Industrial Aluminium Production: the Hall-Heroult Process Modelling*, ECS Transactions, Kanada, 2009.
- [39] <http://wasteportal.net/en/system-aspects/environmental-and-health-aspects/aluminium-waste> (11.07.2023.)
- [40] International Aluminium Institute: <http://world-aluminium.org> (11.07.2023.)
- [41] <https://www.suez.co.uk/en-gb/our-offering/communities-and-individuals/education-tools-and-resources/what-happens-to-waste/recycling/cans> (15.07.2023.)
- [42] D. Raabe, D. Ponge, P. J. Uggowitzer, M. Roscher, M. Paolantonio, C. Liu, H. Antrekowitsch, E. Kozeschnik, D. Seidmann, B. Gault, F. De Geuser, A. Deschamps, C. Hutchinson, C. Liu, Z. Li, P. Prangnell, J. Robson, P. Shanthraj, S. Vakili, C. Sinclair, L. Bourgeois, S. Pogatscher, *Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys*, *Progress in Materials Science*, Volume 128, Pages 1-119, 2022.
- [43] <https://international-aluminium.org> (10.07.2023.)
- [44] <https://www.statista.com> (10.07.2023)
- [45] K. Buxmann, A. Koehler, D. Thylmann, *Water scarcity footprint of primary aluminium, LCA of Metals and Metal Products: Theory, Method and Practice*, Springer International Publishing, Switzerland, 2016

ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI

Ime i prezime: Lea Grubišić

Datum i mjesto rođenja: 29.06.2001., Sisak

Adresa: Hrvatskog narodnog preporoda 23, Sisak

Telefon: 098/929 1551

E-mail: leagrubic29@gmail.com

OBRAZOVANJE

2008. – 2016. – Osnovna škola „Braća Bobetko“ Sisak

2016. – 2020. – Gimnazija Sisak, opći smjer

2020. – danas – Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, preddiplomski sveučilišni studij
Metalurgija, smjer Industrijska ekologija

VJEŠTINE

Poznavanje i vladanje radom na računalu

Znanje engleskog jezika

Vozački ispit: B kategorija