

# Rekristalizacijsko žarenje aluminijevih legura serije EN-AW 50XX

---

Alviž, Lovre

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:239859>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Lovre Alviž

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Lovre Alviž

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se profesoru Darku Landeku na mentorstvu i velikoj pomoći pruženoj prilikom pisanja ovog završnog rada. Također se zahvaljujem tvrtki Impol-TLM i zaposlenicima koji su mi omogućili korištenje laboratorija i pružili veliku pomoć pri izvođenju eksperimenata i mjerenja te pri pisanju rada.

Također se zahvaljujem roditeljima i prijateljima na konstantnoj potpori prilikom studiranja.

Lovre Alviž



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Lovre Alviž** JMBAG: **0035224292**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Rekristalizacijsko žarenje aluminijevih legura serije EN-AW 50XX**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Recrystallization annealing of aluminum alloys of the EN-AW 50XX series**

Opis zadatka:

Aluminijeve legure iz skupine EN-AW 50XX svoja uporabna svojstva postižu nakon očvršćivanja defomacijom u hladnom stanju. Obrada defomacijom uobičajeno se provodi s dva ili više ponovljenih postupaka oblikovanja, između kojih se primjenjuje rekristalizacijsko žarenje za postizanje dobre defomabilnosti nužne za nastavak oblikovanja. U završnom postupku hladnog oblikovanja postižu se tražena mehanička svojstva i zadane dimenzije očvrstnutog predmeta. U radu treba opisati promjene mikrostrukture i svojstava aluminijevih legura iz serije EN-AW 50XX u postupcima provlačenja i rekristalizacijskog žarenja.

U eksperimentalnom dijelu rada treba analizirati mikrostrukturu i mehanička svojstva izabrane Al-Mg legure na početku obrade hladnom defomacijom, nakon rekristalizacijskog žarenja i završnog provlačenja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

## SADRŽAJ

<b>SADRŽAJ</b> .....	1
<b>POPIS SLIKA</b> .....	3
<b>POPIS TABLICA</b> .....	4
<b>POPIS OZNAKA</b> .....	5
<b>SAŽETAK</b> .....	6
<b>SUMMARY</b> .....	7
<b>1. UVOD</b> .....	8
<b>2. TEHNIČKI ALUMINIJ I NJEGOVE LEGURE</b> .....	9
2.1. Tehnički aluminij .....	9
2.2. Aluminijske legure .....	10
2.3. Aluminijske legure serije 50XX .....	10
2.4. Mehanička svojstva aluminijskih legura serije 50XX .....	11
<b>3. REKRISTALIZACIJSKO ŽARENJE ALUMINIJSKIH LEGURA</b> .....	13
3.1. Hladna deformacija tehnički čistog aluminijskog .....	13
3.2. Uvjeti rekristalizacije .....	14
<b>4. PROIZVODNI PROCES LEGURE 5005</b> .....	17
<b>5. METODE KARAKTERIZACIJE VALJANIH TRAKA I LIMOVA</b> .....	19
5.1. Statičko vlačno ispitivanje .....	19
5.1.1. Amsler kidalica .....	19
5.1.2. Priprema statičkog vlačnog ispitivanja .....	20
5.1.3. Uzorkovanje ispitne epruvete .....	20
5.1.4. Točnost statičkog vlačnog ispitivanja .....	22
5.2. Ispitivanje tvrdoće .....	23
5.3. Metalografska priprema i analiza mikrostrukture .....	25
5.3.1. Izrezivanje ispitnog uzorka .....	25
5.3.2. Vruće zalijevanje uzoraka .....	26
5.3.3. Brušenje i poliranje .....	27
5.3.4. Elektrolitičko nagrizanje površine .....	28
5.3.5. Svjetlosna mikroskopija .....	29
<b>6. PLAN POKUSA</b> .....	32
6.1. Plan statičkog vlačnog pokusa .....	32
6.2. Plan ispitivanja tvrdoće i mikrostrukture .....	32
<b>7. REZULTATI ISPITIVANJA</b> .....	33

---

<b>7.1. Analiza mikrostrukture svjetlosnom mikroskopijom .....</b>	<b>33</b>
<b>7.2. Rezultati ispitivanja tvrdoće .....</b>	<b>35</b>
<b>7.3. Rezultati stastičkog vlačnog ispitivanja .....</b>	<b>35</b>
<b>8. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>39</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>40</b>

## POPIS SLIKA

Slika 1. Aluminijska traka na valjku

Slika 2. Deformacijom izdužena kristalna zrna aluminija

Slika 3. Dijagram postupka rekristalizacijskog žarenja aluminijeve legure 5005

Slika 4. Proizvodni proces prikazan u internom računalnom programu

Slika 5. Zaslona sa videoekstenziometrom na kidalici

Slika 6. Amsler ADR – TS – 100THZ 100kN

Slika 7. Oblik epruvete za vlačno ispitivanje

Slika 8. Epruveta za vlačno ispitivanje sa referencama za ekstenziometar

Slika 9. Paralelnost pravca modula elastičnosti i pravca podizanja opterećenja

Slika 10. Površina ispitnog uzorka: a) prije obrade, b) nakon obrade

Slika 11. Shematski prikaz metode ispitivanja tvrdoće prema metodi Brinell

Slika 12. Unutrašnjost Labotom 5 uređaja

Slika 13. Vruće zalijevanje ispitnog uzorka: a) izgled uzorka, b) uređaj Struers CITOPRESS30

Slika 14. Mikroskop Olympus GX53 Olympus Stream Motion

Slika 15. Mikrostruktura aluminijeve legure 5005 nakon hladnog valjanja snimljena na invertnom mikroskopu s povećanjem: a) 5:1, b) 20:1

Slika 16. Mikrostruktura aluminijeve legure 5005 nakon rekristalizacijskog žarenja snimljena na invertnom mikroskopu s povećanjem: a) 5:1, b) 20:1

Slika 17. Dijagram sila-produljenje za 5 ispitivanja aluminijeve legure 5005 u stanju obrade H18

Slika 18. Dijagram sila-produljenje za 5 ispitivanja aluminijeve legure 5005 u stanju obrade H0



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Kemijski sastav legure 5005 prema normi EN 573-3:2009

Tablica 2. Kemijski sastav bloka aluminijske legure 5005 nakon lijevanja

Tablica 3. Parametri obrade metalografskog uzorka brušenjem

Tablica 4. Parametri obrade metalografskog uzorka poliranjem

Tablica 5. Vrijednosti tvrdoće aluminijske legure 5005 prije i nakon rekristalizacijskog žarenja

Tablica 6. Vrijednosti mehaničkih svojstava za 5 legure 5005 u stanju obrade H18

Tablica 7. Vrijednosti mehaničkih svojstava za 5 legure 5005 u stanju obrade H0

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
Rm	N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća
Rp <sub>0.2</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Konvencionalna granica istežljivosti
Re	N/mm <sup>2</sup>	Granica razvlačenja
A	%	Istežljivost

## SAŽETAK

U radu je opisana prerada valjanjem u hladnom stanju i rekristalizacijsko žarenje aluminij - magnezijeve legure 5005. U postupku obrade hladnim valjanjem kod ove legure dolazi do izduženja kristalnih zrna u smjeru valjanja što ima utjecaj na povećanja čvrstoće i tvrdoće. U promatranom tehnološkom procesu obrade valjanjem ova pojava otežava nastavak hladnog oblikovanja i smanjuje obradljivost rezanjem. Za oporavak strukture i postizanje povoljnih mehaničkih i tehnoloških svojstava primjenjuje se toplinska obrada rekristalizacijsko žarenje u dvije faze na temperaturama 320 °C i 420 °C u trajanju od 4 sata. U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ispitivanje tvrdoće, statičko vlačno ispitivanje i analiza mikrostrukture legure 5005 prije i nakon rekristalizacijskog žarenja. Rezultati ispitivanja nakon primjene rekristalizacijskog žarenja pokazuju smanjenje tvrdoće sa 54,72 HB na 32,48 HB i smanjenje vlačne čvrstoće s 183 N/mm<sup>2</sup> na 113 N/mm<sup>2</sup>, uz povećanje rezljivosti i oblikovljivosti.

Ključne riječi: aluminij, valjanje, rekristalizacija, tvrdoća, čvrstoća, žarenje, zrna

**SUMMARY**

The paper describes cold rolling processing and recrystallization annealing of aluminum-magnesium alloy 5005. In the cold rolling process of this alloy, crystal grains are elongated in the direction of rolling, which has an effect on increasing strength and hardness. In the observed technological process of rolling processing, this phenomenon makes it difficult to continue cold forming and reduces workability by cutting. To recover the structure and achieve favorable mechanical and technological properties, heat treatment recrystallization annealing is applied in two phases at temperatures of 320 °C and 420 °C for 4 hours. In the experimental part of the work, hardness testing, static tensile testing and microstructure analysis of alloy 5005 before and after recrystallization annealing were performed. Test results after the application of recrystallization annealing show a decrease in hardness from 54.72 HB to 32.48 HB and a decrease in tensile strength from 183 N/mm<sup>2</sup> to 113 N/mm<sup>2</sup>, with an increase in cutability and formability.

Keywords: aluminum, rolling, recrystallization, hardness, strength, annealing, grains

## 1. UVOD

Aluminij je kemijski element simbola Al s atomskim brojem 13. Ima gustoću nižu nego ostali učestali metali, otprilike 1/3 manju nego čelik. Ima veliki afinitet prema kisiku tako da u dodiru sa zrakom na površini metala tvori se površinski zaštitni sloj. Vizualno podsjeća na srebro, zbog svoje boje i zbog velike sposobnosti refleksije svjetla. Mekan je, nemagnetičan i duktilan materijal. Aluminij je dvanaesti najučestaliji element u svemiru.

U izradi dijelova i konstrukcija koristi se tehnički čisti aluminij i njegove legure. Aluminijske legure dijele se na ljevačke i deformacijski oblikovljive. Deformacijsko oblikovanje proizvoda od aluminijskih legura uobičajeno se provodi u nekoliko faza između kojih se primjenjuje rekristalizacijsko žarenje za oporavak mikrostrukture i postizanje dobre deformabilnosti .

U radu će se promatrati utjecaj proizvodnog procesa hladnog valjanja na mehanička svojstva i oblik zrna aluminijskih legura serije 50XX uspoređivanjem njihovih vrijednosti prije i nakon toplinske obrade rekristalizacijskog žarenja u sklopu proizvodnog procesa Impol TLM-a.

## 2. TEHNIČKI ALUMINIJ I NJEGOVE LEGURE

### 2.1. Tehnički aluminij

Globalna proizvodnja aluminija se svake godine kontinuirano povećava zbog njegove sve češće primjene u raznim industrijskim granama. Aluminijeva jedinstvena svojstva - mala masa, visoka čvrstoća i otpornost na koroziju čine ga idealnim materijalom za uporabu u konvencionalnim ali i novim promjenama. Postaje sve više važan za automobilsku industriju, pakiranje pića i hrane, razvoj transportacijske infrastrukture, izradu obrambene, zrakoplovne i svemirske opreme. Godine 2016. proizvodnja aluminija iznosila je 58.8 milijuna metričkih tona. Jedini metal koji je ima veću proizvodnju je željezo (1,231 milijuna metričkih tona) [1].



**Slika 1. Aluminijaska traka na valjku**

Proces dobivanja primarnog aluminija može se podijeliti u tri nezavisne faze: početno rudarenje potrebnih sirovih materijala poput boksita i drugih ruda, proces obrade rude i pripreme aluminijevog oksida (glinice) i na kraju proces dobivanja primarnog aluminija iz glinice. Ovaj proces je potreban zato što u prirodi aluminij ne postoji kao čisti metal zbog velikog kemijskog afiniteta prema kisiku, već u obliku oksida. Aluminij je jedan od najučestalijih materijala koji se može pronaći u zemljinoj kori.

Najčešće primjene aluminija jesu sljedeće [1]:

- Transportna industrija (automobili, zrakoplovi, vlakovi, vagoni, brodovi, bicikli, svemirska tehnologija) – primjena aluminija zbog male gustoće

- Ambalažna industrija (limenke, konzerve, folije) – primjena aluminijske zbog ne toksičnosti, ne adsorpcije i ne stvaranja metalnih krhotina
- Građevinska industrija (prozori, vrata, aluminijske zidne konstrukcije, krovovi) – primjena aluminijske kad je potrebno osigurati malu masu građevinske konstrukcije
- Elektrotehničke primjene (generatori, motori, transformeri) – koristi se zbog svoje relativno niske cijene, jako dobre vodljivosti, niske gustoće i dobre otpornosti na koroziju
- Razne kućanske primjene (pribor za jelo, namještaj) – primjena aluminijske zbog estetskog izgleda, niske gustoće i jednostavnosti proizvodnje
- Elementi stojeva i alati (oprema za proizvodnju, cijevi, oruđe) – primjena aluminijske zbog dobrih mehaničkih svojstava, nezapaljivosti i otpornosti na koroziju.

## 2.2 Aluminijske legure

Aluminij kao i većina čistih metala ima nisku čvrstoću i zbog toga se ne može koristiti u primjenama gdje je potrebna visoka otpornost na deformacije. Stoga se aluminiju dodaju legirni elementi čija je primarna svrha povećati čvrstoću i poboljšati ostala mehanička svojstva. Najčešći legirni elementi su magnezij (Mg), bakar (Cu), mangan (Mn), silicij (Si), nikal (Ni) i cink (Zn). Aluminijske legure se uobičajeno dijele na legure za lijevanje i legure za gnječenje. Obje se vrste legura mogu dalje podijeliti na toplinski obradive i toplinski ne obradive. Otprilike 85 % legura su legure za gnječenje koje se koriste za proizvodnju valjanih ploča, limova, folija i ekstruzija [1].

Aluminijske gnječene legure postale su bitne za svemirsku i zrakoplovnu industriju od kad su se počele primjenjivati metalne oplata na zrakoplovima. Među najviše korištenim legurama su aluminij – magnezij legure koje posjeduju najnižu gustoću u odnosu na ostale aluminijske legure.

Aluminijske legure klasificiraju se numeričkim sustavom (prema normi ANSI) ili imenično iskazivanjem najzastupljenijih legirnih elemenata (prema normama DIN i ISO).

## 2.3. Aluminijske legure serije 50XX

Aluminijske legure serije 5000 su aluminij-magnezij legure (AlMg) u kojima je glavni legirni element magnezij. Većina standardnih legura ove serije sadrži i male udjele mangana

(AlMg(Mn)). Čiste AlMg legure i AlMg(Mn) legure pripadaju skupini srednje čvrstih, prirodnih legura, odnosno legura koje nisu toplinski očvrstive.

AlMg legure su jedne od najviše korištenih aluminijskih legura za proizvodnju konstrukcijskih elemenata. Najčešće se hladno deformiraju valjanjem ili kovanjem. Ove legure se lako zavaruju kad je njihov udio magnezija veći od 3%. Od AlMg legura najčešće se proizvode valjani proizvodi kao i cijevi, šipke i otkovci.

Zbog visoke otpornosti na koroziju i visoke čvrstoće na niskim temperaturama najčešće se koriste u brodogradnji, za izradu laboratorijske opreme, za izradu cjevovoda, za dijelove opreme za rashlađivanje i u automobilskoj industriji. Dobra zavarljivost je ključna kod uporabe u zrakoplovnoj i vojnoj industriji. Za povećanje zavarljivosti aluminij-magnezij legurama se dodaju se skandij i cirkonij.

#### **2.4. Mehanička svojstva aluminijskih legura serije 50XX**

Čvrstoća aluminijskih legura kod legura serije 50XX povećava se legiranjem s magnezijem. Pri niskim udjelima magnezija, povećanje čvrstoće je relativno veliko dok se s povećanjem udjela magnezija povećanje čvrstoće smanjuje. Razlog tomu su visoke energije vezanja šupljina u kristalnoj strukturi s atomima magnezija. Mjesta gdje se nalaze šupljine nakon vezanja s Mg više nisu dostupna kao slobodna mjesta i to osigurava povećanje čvrstoće. Loša strana je što se na tim mjestima javlja veća mogućnost plastične deformacije.

Granica razvlačenja legura serije 50XX povećava se linearno sa povišenjem udjela magnezija s 45 N/mm<sup>2</sup> pri 1 % Mg do oko 120 N/mm<sup>2</sup> s oko 4 % Mg. Vlačna čvrstoća raste još strmijim gradijentom sa 60 N/mm<sup>2</sup> pri koncentraciji od 1 % magnezija do 240 N/mm<sup>2</sup> pri udjelu magnezija od 4 % [2].

Kod čistog aluminijskog utjecaj veličine zrna na mehanička svojstva je toliko malen da je zanemariv ali kod aluminijskih legura, utjecaj veličine zrna raste s povećanjem udjela legiranih elemenata. Pri udjelu magnezija od 5 %. materijal s veličinom zrna oko 50 μm postiže produljenje od oko 0,25 dok pri veličini od 250 μm produljenje raste na 0,28. Legura AlMg8 ima produljenje 0,3 s veličinom zrna od 200 μm.

U radu će se istraživati promjena mehaničkih svojstava aluminijske legure 5005 tijekom rekristalizacijskog žarenja. Glavno svojstvo ove aluminij – magnezij legure je jako dobra otpornost na atmosfersku koroziju. Ova legura se koristi u građevinarstvu za okvire prozora i



vrata, ukrasne dijelove fasada i krovova i slične arhitektonske namijene, za dijelove klimatizacijskih uređaja, dijelove namještaja itd. Legura 5005 može postići visoke umjerene do visoke vrijednosti čvrstoće nakon hladnog oblikovanja deformiranjem. Ova legura također pokazuje relativno visoku čvrstoću nakon zavarivanja u usporedbi s drugim aluminijevim legurama. U tablici 1 naveden je uobičajeni kemijski sastav legure 5005.

**Tablica 1. Kemijski sastav legure 5005 prema normi EN 573-3:2009**

<b>Legirni element</b>	<b>Al</b>	<b>Mg</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Zn</b>
<b>Gornja granica</b>	99.5	1.1	0.2	0.7	0.1	0.2	0.3	0.25
<b>Donja granica</b>	97.0	0.5	0	0	0	0	0	0

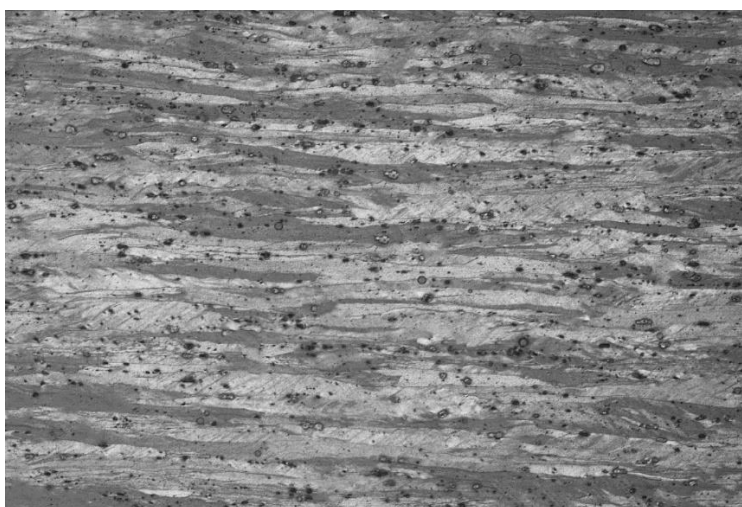
### 3. REKRISTALIZACIJSKO ŽARENJE ALUMINIJEVIH LEGURA

#### 3.1. Hladna deformacija tehnički čistog aluminija

Hladna deformacija može dovesti do promjena oblika kristalnog zrna kod polikristalnog aluminija, koje se očituju kao izduženje u smjeru vanjskog opterećenja. Kod hladnog valjanja dolazi do izduženja zrna u smjeru valjanja. Za vrijeme deformiranja, pokretne dislokacije u kristalnoj strukturi presijecaju se s drugim dislokacijama i tako dovode do povećanja broja i veličine dislokacija pri čemu se dodatno povećava i veličina granica zrna.

Pogreške i nesavršenosti kristalne rešetke postoje u aluminiju i u nedeformiranom stanju. Pogreške kristalne rešetke obuhvaćaju: točkaste pogreške (vakancije, intersticijske atome, zamjenske atome), jednodimenzionalne pogreške (dislokacije), dvodimenzionalne pogreške (granice zrna) i trodimenzionalne pogreške (čestice sekundarne faze i nečistoće). Sve navedene pogreške djeluju kao prepreka gibanju dislokacija, odnosno izazivaju očvršnuće mikrostrukture.

Tijekom deformacije dislokacije se vežu s drugim dislokacijama što dovodi do povećanja gustoće dislokacija. Osim toga dolazi i do produženja duljine granica zrna u deformiranoj kristalnoj rešetci. Slika 2. prikazuje izgled zrna prilikom kompresije nakon procesa valjanja. Orijehtacije zrna imaju različite rotacijske karakteristike, ali ona će se rotirati prema jednoj ili nekoliko stabilnih orijentacijskih pozicija nakon teške deformacije pa će se tako formirati deformacijska tekstura. Najbitnije svojstvo orijentacijske distribucije kod polikristalnog aluminija je da se distribucija odmakla iz nasumične distribucije prema onoj većinski orijentiranoj u smjeru procesa valjanja (ili drugog sličnog procesa deformiranja).



Slika 2. Deformacijom izdužena kristalna zrna tehnički čistog aluminija

Kod jako deformiranih aluminijskih legura javlja se fenomen oporavka gdje se javlja spontano obnavljanje kristalnih zrna zbog nestabilnog stanja materijala uzrokovanog visokom potencijalnom energijom aluminijskog materijala tijekom deformacije u hladnom stanju. U radu se neće promatrati ovaj fenomen zato što je oporavak zrna zanemariv kod uobičajenih vrijednosti plastične deformacije kojoj je izložen aluminij serije 5005 u izradi dijelova i konstrukcija.

### 3.2. Uvjeti rekristalizacije

Rekristalizacija je proces kojim se deformirana zrna zamjenjuju novim zrnima bez defekata dok se sva deformirana zrna ne zamjene u potpunosti novim zrnima. Ovaj proces najčešće prati smanjenje čvrstoće i tvrdoće materijala i povećanje duktilnosti. Zbog toga se ovaj proces može koristiti namjerno kao međukorak određenog proizvodnog procesa ili se može dogoditi i kao neželjeni nusprodukt nekog drugog procesa.

Rekristalizacija obuhvaća gibanje dislokacija i stvaranje poligonalnih granica zrna te nukleaciju i rast novih zrna. Rast zrna napreduje dok se nova zrna međusobno ne sudare i dok sva deformirana zrna nisu zamijenjena novim.

Faze rekristalizacije podložne su djelovanju slijedećih empirijski utvrđenih pravila [2]:

1. Rekristalizacija je toplinski aktiviran proces u kojem je brzina mikroskopskih mehanizama koji kontroliraju nukleaciju, rast i oporavak zrna ovisna o temperaturi žarenja.
2. Procesi rekristalizacije počinju na određenoj kritičnoj temperaturi – rekristalizacija zahtjeva određenu minimalnu temperaturu za početak gibanja dislokacija i poligonizaciju granica zrna.
3. Rekristalizacija traži određenu kritičnu unesenu energiju deformacije za aktivaciju nukleacije i početak rasta zrna.
4. Prethodna deformacija utječe na temperaturu kristalizacije – povećanjem magnitude prethodne deformacije ili smanjenjem temperature tijekom deformacije povećat će se pohranjena energija i broj potencijalnih mjesta nukleacije. Temperatura rekristalizacije smanjuje se s povećanjem unesene deformacije u mikrostrukturu materijala.
5. Inicijalna veličina zrna značajno utječe na temperaturu rekristalizacije – granice zrna su jako dobra mjesta za početak nukleacije. S obzirom na to da povećanjem zrna dolazi do smanjenja ukupne duljine granica zrna, veća zrna dovesti će do smanjenja brzine nukleacije, a s tim i do povećanja temperature rekristalizacije.

6. Povećavanjem deformacije materijala ili smanjenjem deformacijske temperature dolazi do povećanja brzine nukleacije

Tijekom plastične deformacije dio unesene mehaničke energije se pretvara u toplinu, dok drugi manji dio (1 do 5%) ostaje pohranjen u materijalu u obliku mikrostrukturnih pogrešaka– najviše dislokacija. Promjena položaja i eliminacija dislokacija u materijalu smanjuje unutrašnju energiju sustava te će to biti termodinamička sila koja aktivira proces rekristalizacije. Pri srednjim i visokim temperaturama kod aluminijske legure će doći do oporavka te će se slobodne dislokacije rasporediti tako da tvore sub zrna okružena granicama zrna malih međusobnih kutova. Sila koja će aktivirati rekristalizaciju bit će razlika između oblika i veličine deformiranog i rekristaliziranog zrna, koja se može odrediti na temelju razlike u gustoći dislokacija ili veličine sub zrna [1].

Tijekom procesa rekristalizacije, zrna ne rastu kao kod klasične nukleacije iz nukleusa već rastu iz prethodno postojećih pod-zrna i ćelija stvorenih samo organizacijom dislokacija. Vrijeme inkubacije prije početka nukleacije novih zrna, je vremenski period u kojem pod-zrna s niskokutnim granicama počinju akumulirati dislokacije sve više se postaju različito orijentirana u odnosu na susjedna pod-zrna. Povećanje razlike u orijentaciji kristalnih ravnina novih zrna u odnosu na deformirana zrna povećava mobilnost granica zrna i udjel novih pod-zrna. Ako jedno pod-zrno ima povoljnije uvijete od susjednih (veću gustoću dislokacija, povoljniju orijentaciju ili veći volumen) to pod-zrno će rasti značajno brže od ostalih. Rast zrna stvara sve veću razliku u orijentaciji granice u odnosu na susjedna zrna i novo nedeformirano zrno postaje jasno vidljivo [1].

Za svaki metalni materijal i uvjete proizvodnog procesa postoji karakteristična temperatura rekristalizacije. Njena vrijednost ovisi o slijedećim utjecajnim faktorima [2]:

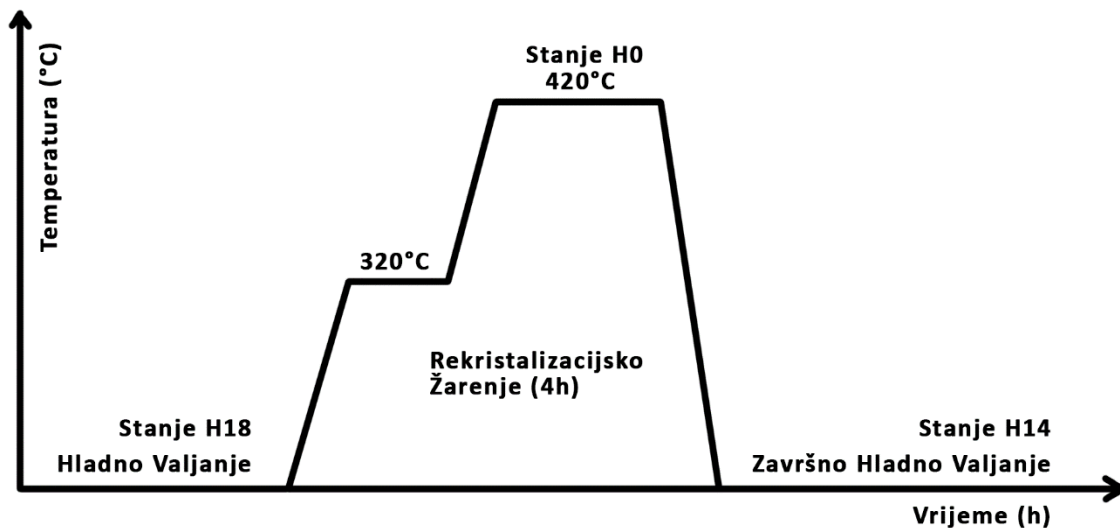
- Dulje trajanje žarenja smanjuje potrebnu temperaturu rekristalizacije
- Legure traže veću temperaturu rekristalizacije nego čisti metali
- Povećanje iznosa hladne deformacije smanjuje temperaturu rekristalizacije
- Manja hladno oblikovana zrna zahtjevaju niže temperaturu rekristalizacije

Tipična temperatura rekristalizacije aluminijske legure je oko 200 °C, dok je točka taljenja na 660 °C.

Primjena rekristalizacije značajno utječe na svojstva aluminijske legure i njegovih hladno oblikovljivih legura. Tijekom hladnog valjanja aluminijske legure, smanjivanjem debljine limova, traka i folija dolazi do izduženja kristalnih zrna u smjeru valjanja što dovodi do povećanja tvrdoće čvrstoće i

krutosti materijala. Ova pojava je nepoželjna za nastavak plastične deformacije i za postizanje niže vrijednosti tvrdoće i čvrstoće uz povećanu žilavost legure. Stoga se u proizvodni proces gnječivih aluminijskih legura uvodi postupak rekristalizacijskog žarenja.

Rekristalizacijsko žarenje provodi se u pećima koje su dovoljno velike da se u njih mogu šaržirati svitkovi i blokovi uz ravnomjernu raspodjelu temperature takvu da svaki dio šarže bude jednako ili približno jednako zagrijan. Aluminijske legure serije 5XXX, koje će se ispitivati u radu, najčešće se rekristalizacijski žare na temperaturi od 300 °C do 400 °C u trajanju nekoliko sati. Nakon što je završen proces žarenja, svitkovi i blokovi se najčešće ostavljaju u ugašenoj ali još uvijek zagrijanoj peći kako bi se kontrolirano i postepeno ohladili do sobne temperature. Ponekad je potrebno koristiti peći sa zaštitnom/inertnom atmosferom za spriječavanje pojave oksidacije površine.



Slika 3. Dijagram postupka rekristalizacijskog žarenja legure 5005

#### 4. PROIZVODNI PROCES LEGURE 5005

Legura 5005 (P10A u internoj nomenklaturi) koja se ispituje u eksperimentalnom dijelu završnog rada proizvedena je u proizvodnom procesu Impol TLM-a. Proizvodni proces ove legure započinje u ljevaonici gdje je gdje je izljeven blok odgovarajućeg kemijskog sastava i dimenzija. Kemijski sastav legure 5005 naveden je u tablici 2.

Propisane dimenzije bloka jesu slijedeće:

- debljina – 505 mm
- širina – 1370 mm
- dužina – 5000 mm
- težina – 9,2 tone

**Tablica 2. Kemijski sastav bloka aluminijske legure 5005 nakon lijevanja**

Legirni element	Al	Mg	Cu	Fe	Cr	Mn	Si	Zn
Udio (%)	98,683	0,7224	0,0133	0,31442	0,0154	0,0824	0,1130	0,0074

Nakon hlađenja i obrade glodanjem i piljenjem u pogonu ljevaonice, blok je internim transportom prebačen u pogon Tople valjaonice gdje je izvršena toplinska obrada bloka homogenizacijom aluminijske legure u trajanju 6 sati pri 540 °C.

Nakon toplinske obrade slijedi toplo valjanje u 17 prolaza gdje se blok od dimenzije od 505 mm stanjuje na debljinu trake od 6 mm. Potom se na limovima za nastavak valjanja provodi obrezivanje ruba i nakon toga se nastavlja hladno valjanje. U nastavku hladnog valjanja provodi se predvaljanje pri kojem se debljina materijala smanjuje sa 6 mm na 3,3 mm (u dva prolaza s međudebljinom od 4,2 mm ). Na slici 3 prikazan je računalni zapis tehnološkog procesa valjanja i rekristalizacijskog žarenja.

Nakon hladne deformacije na valjačkom stanu V-22 provodi se rekristalizacijsko žarenje u kojem se smanjuje tvrdoća materijala sa stanja H18 na stanje 0. Rekristalizacijsko žarenje provodi se u dvije faze na temperaturama 320 °C i 420 °C u trajanju od 4 sata.

Nakon postignutog stanja 0, materijal još jednom završno prolazi kroz valjke kako bi postigao stanje H14, te je pritom debljina materijala smanjena sa 3,3 mm na završnu debljinu od 2,5 mm. Proizvodni proces ove transportne jedinice završava na Salico liniji gdje se na završnoj debljini od 2,5 mm materijal obrezuje na oblik lim koji se pakira i otprema kupcima.

U eksperimentalnom dijelu rada promatrat će se uzorci prikupljeni nakon hladnog valjanja materijala pri debljini od 3,3 milimetara i stanju H18, te uzorci prikupljeni nakon rekristalizacijskog žarenja pri stanju H0. [3]

```

D264M01-V04          *** Tehnologija zaključenih RN ***
2024-01-17
Printer: BREZ
Firma:   God. RN:     RN:       / A   PP: 073
Ident proizvoda :     Klasifikacija:           Zlitina   : P10A
Naziv proizvoda : TRAKA RAVNANA NATEG KZ:     /           Stanje mat.:
Dimenzija proizv.: 2,50000 X 1250,0 / 508 / 1280 / 0           Stanje pov.:
Primaoc   :                                           Količina: 7000,0
*****TEHNOLOGIJA*****
Ident ulaza: 771687 Ukupni PF: 1,212 Br. op.: 8 Tehnolog: BREZ TEHNOLOGA

```

Op.	Str.	TEHNOLOŠKO UPUTSTVO	Br	TPZ	T1	T2	PF0	Od
1	2250	G-1 OBRADA BLOKOVA 505X1370X5000	,3		,035	1,000	1,020	4
2	0450	P-61 HOMOGENIZACIJA BLOKOVA 540/6H	,1		,097	1,000	1,000	0
3	3050	V-24 TOPLO VALJANJE I OBREZIVANJE 6,0X1300	,1		,043	4,000	1,094	1
4	3150	V-22 PREDVALJANJE 6,0-4,2-3,3	,1		,067	2,000	1,008	2
5	0350	PP-5 MEDUŽARENJE 420/320/4H	,5		,393	2,000	1,000	0
6	3150	V-22 ODVALJIVANJE 3,3-2,5	,1		,045	2,000	1,008	2
7	4153	SALICO-OBREZIVANJE 2,5X1250	,2		,071	1,000	1,068	3
8	9431	PAK2 PAKIRANJE PO UGOVORU	,1		,222	2,000	1,000	0

Slika 4. Proizvodi proces prikazan u internom računalnom programu

## 5. METODE KARAKTERIZACIJE VALJANIH TRAKA I LIMOVA

### 5.1. Statičko vlačno ispitivanje

Mehaničko ispitivanje vlačne čvrstoće metala provodi se radi određivanja svojstava tog metala na temelju jednakomjernog uzdužnog opterećenja po presjeku ispitne epruvete sve do njenog loma. Uporabljivost materijala karakterizira se vrijednostima vlačne čvrstoće ( $R_m$ ), granice razvlačenja ( $R_e$ ), konvencionalne granice razvlačenja ( $R_{p0,2}$ ) i izduženjem ( $A$ ). Ove vrijednosti najviše ovise o kemijskom sastavu legure, prisutnim nečistoćama, veličini i rasporedu faza, unutarnjim deformacijama, veličini zrna, itd.

Vlačna ispitivanja u radu provedena su na kidalici ADR – TS – 100THZ 100 kN. Ispitivanje je vođeno računalnim programom *TestandMotion*. Ovom kidalicom mogu se ispitivati samo materijali deblji od 200  $\mu\text{m}$ . Metode ispitivanja korištene u vlačnom pokusu određene su prema normi ISO 6892 – 1: 2016. [4]

#### 5.1.1. Amsler kidalica

Amsler kidalica ima dva područja sile opterećenja:

1. 0 N do 5000 N
2. 0 N do 100000 N

Izduženje se određuje uz pomoć videoekstenziometra NG. Brzina predopterećivanja iznosi 120 N/mm<sup>2</sup>. Na slici 4 prikazan je zaslon Amsler kidalice s direktnim prikazom videoekstenziometra. Na slici 5 prikazana Amsler ADR – TS – 100THZ 100 kN kidalica.



Slika 5. Zaslon sa videoekstenziometrom na kidalici





Slika 6. Amsler ADR – TS – 100THZ 100 kN

### 5.1.2. Priprema statičkog vlačnog ispitivanja

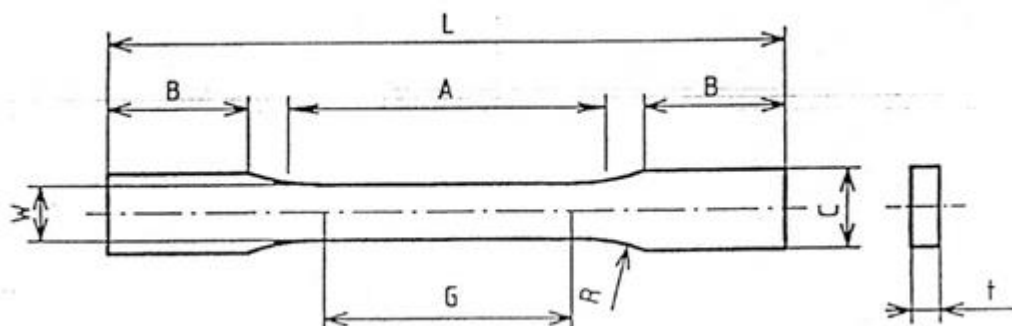
Pravilno provedena ispitivanja se moraju obavljati pri temperaturnom rasponu od 10 °C do 35 °C. Ako je potrebno imati kontrolirano okruženje, onda je ispitivanja moguće obaviti pri 23 °C ± 0,5 °C.

Metodom kojom se provode vlačni pokusi osigurane su brzine ispitivanja prema normi EN ISO 6892 – 1. Tako se brzina modula elastičnosti E određuje kao prirast od 12 MPa/s. U trenutku kad  $\Delta L$  iznosi 0,3 mm ova brzina prelazi u brzinu ispitivanja od 24 mm/min.

### 5.1.3. Uzorkovanje ispitne epruvete

Uzorak dostavlja pogon VTL – valjaonica traka i limova. Veličina uzorka mora biti dovoljna za izrezivanje ispitnog uzorka u smjeru poprečno na smjer valjanja. Uzorak također mora biti moguće identificirati prema broju radnog naloga, broju šarže, matičnom broju, leguru i stanju poluproizvoda. Na slici 6 prikazan je oblik epruvete koja se koristi pri vlačnom pokusu na kidalici.

Uzorci za ispitivanje izrađuju se na CNC glodalici tako da imaju oblik i dimenzije propisane standardom EN 485 – 1.



Slika 7. Oblik epruvete za vlačno ispitivanje [4]

Mjerenje debljine epruvete obavlja se mikrometrom čija rezolucija mora biti barem 0,001 mm. Potrebno je izvršiti tri mjerenja te za konačnu debljinu uzima se njihova konačna vrijednost. Mjerenje širine provodi se isti način kao i mjerenje debljine.

Mjerno područje određuje se pomoću etalona ME 46 tako da se etalon postavlja preko epruvete pa se flomasterom povuku dvije kose linije koje ograđuju područje L50 duljine 50 mm, kao što je prikazano na slici 7. Flomasterom povučene linije služe kao referenca videoekstenzimetru za duljinu L50. Za preciznost mjerne metode važno je da povučene linije sadržavaju određeni kut u odnosu na poprečnu os epruvete.



Slika 8. Epruveta za vlačno ispitivanje sa referencama za ekstenziometar

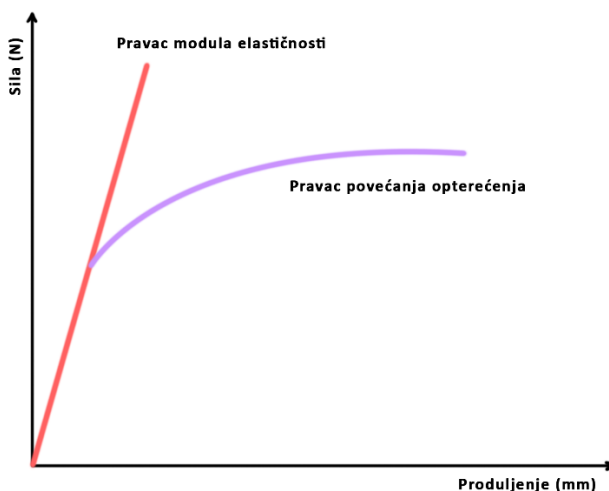
#### 5.1.4. Točnost statičkog vlačnog ispitivanja

Točnost određivanja vlačne čvrstoće određena je razredom točnosti mjerne ćelije sile u ispitivanom području. Na vrijednosti  $R_m$  utječe i brzina ispitivanja. Zato je potrebno održavati brzinu ispitivanja u propisanim vrijednostima standarda. Održavanjem brzine konstantnom za sva ispitivanja omogućuje se ponovljivost rezultata.

Određeni utjecaj na vlačnu čvrstoću ima i kut pod kojim se nalazi epruveta u odnosu na os ispitivanja. Na uređaju ADR – TS – 100THZ 100kN korištenom u ovim ispitivanjima je to jako dobro riješeno jer se kontrola paralelnosti može pratiti izravno na monitoru ekstenzometra. Najveći utjecaj na točnosti određivanja konvencionalne granice razvlačenja ima točnosti određivanja izduženja 0,2 %.

Videoekstenzimetar je uređaj koji koristi kalibraciju vidnog polja kako bi odredio veličinu tog istog polja. Kalibracija za ovu metodu može se izvesti na etalonu ME 46-155 pri čemu je važno da su obje čeljusti u koje je etalon umetnut zatvorene. Apsolutna točnost određivanja veličine tog polja nije važna zato što se određuje izduženje  $A$  koje je bezdimenzijska veličina. Za točnost određivanja izduženja videoekstanzimetar mora imati konstantne svjetlosne uvjete od početka do kraja trajanja ispitivanja.

Točnost ispitivanog  $R_{p0.2}$  potrebno je provjeriti usporedbom paralelnosti pravca modula elastičnosti s pravcem podizanja opterećenja kidalice za vlačni pokus. Ako je vidljivo znatno odstupanje, takve rezultate ne prihvaćamo te je potrebno promijeniti ili postavke metode ispitivanja ili provjeriti je li priprema uzorka i postupka ispitivanja napravljena ispravno. Na slici 8 prikazano je kako bi trebao izgledati odnos pravca modula elastičnosti i pravca podizanja opterećenja kidalice kod slučaja visoke točnosti mjerenja.



Slika 9. Paralelnost pravca modula elastičnosti i pravca povećanja opterećenja

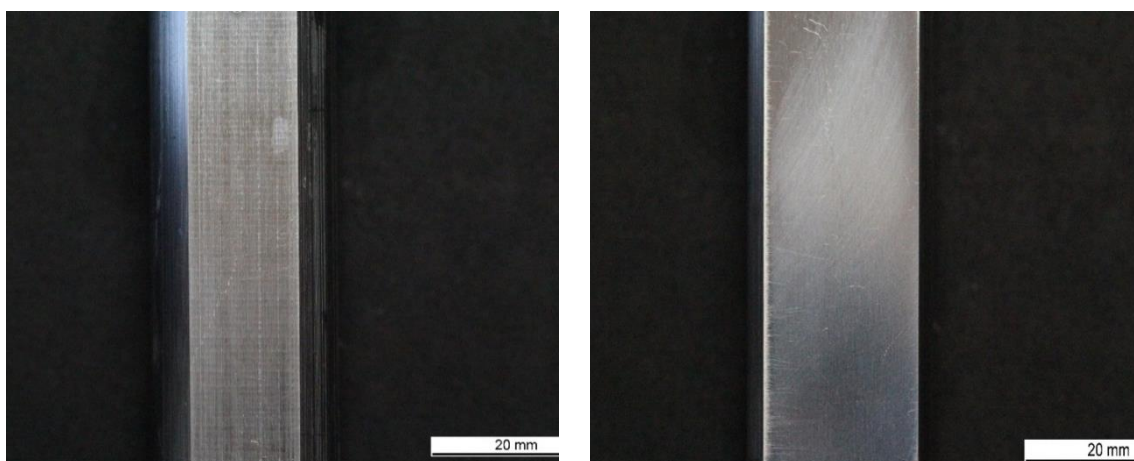
## 5.2. Ispitivanje tvrdoće

Tvrdoća je svojstvo materijala definirano kao otpornosti materijala da se odupre stvaranju lokalne plastične deformacije. Ispitivanja tvrdoće aluminijskih legura u sklopu eksperimentalnog dijela ovog završnog projekta provedena su na uređaju INOVATEST NEXUS 7501. Ispitni uređaj omogućuje odabir između tri metode mjerenja tvrdoće: po Brinellu, po Vickersu i po Rockwellu. Za primjenu na ovim legurama odabrana je metoda po Brinellu zato što program za izračun i prikazivanje podataka na kitalici za vlačni pokus prepoznaju samo vrijednosti zadane u Brinell metodi.

Pravila za provođenje ispitivanje korištenjem Brinell metode jesu slijedeća [5]:

1. Razmak između središta otiska i ruba ispitnog uzorka mora biti najmanje 2.5 puta veći od promjera otiska
2. Razmak između središta susjednih otisaka mora biti najmanje 3 puta veći od promjera otiska
3. Deblja ispitnog uzorka mora biti najmanje 8 puta veća od dubine prešane kuglice

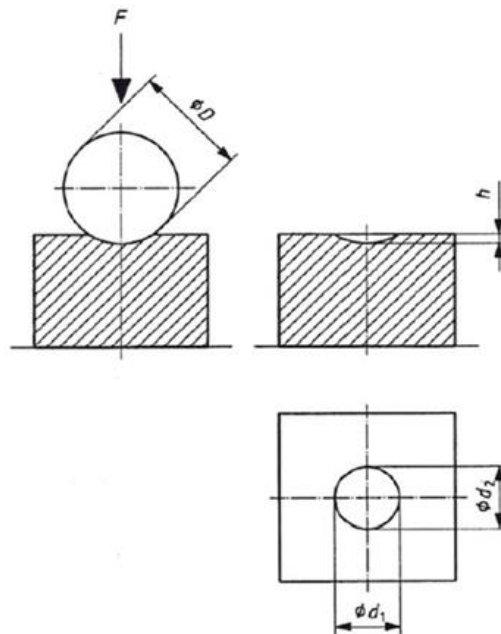
Za mjerenje tvrdoće po Brinellu koristi se kuglicu od tvrdog metala kao utisno tijelo. Konstantnom silom utisne se kuglica u površinu ispitnog uzorka. Ispitni uzorak mora biti pravilno pripremljen s ravnom i glatkom površinom i minimalnom debljinom. Na slici 9 prikazana je kvaliteta površine ispitnog uzorka prije i nakon procesa obrade površine materijala kao procesa pripreme za ispitivanje tvrdoće.



**Slika 10. Površina ispitnog uzorka: a) prije obrade, b) nakon obrade brušenjem**

Dubina utiskivanja kuglice  $h$  definirana je promjerom  $D$  kuglice i srednjim promjerom utiskivanja  $d$  sastavljenim od izmjerenih promjera utiskivanja  $d_1$  i  $d_2$ . Mjerenjem promjera utiskivanja iz tablice za Brinell metodu **očitava se vrijednost tvrdoće po Brinellu za sva tri**

mjerenja i zatim računa srednja vrijednost. Na slici 10 shematski je prikazan izgled kuglice koja se koristi za utiskivanje u materijal prilikom mjerenja tvrdoće Brinell metodom i izgled otiska na površini koji taj kuglica ostavi.



Slika 11. Shematski prikaz metode ispitivanja tvrdoće prema metodi Brinell [5]

### 5.3. Metalografska priprema i analiza mikrostrukture

U metalografskom laboratoriju Impol-TLM obavljaju se procesi pripremanja i obrade uzoraka i njihova ispitivanja na svjetlosnom mikroskopu. Prije ispitivanja na mikroskopu potrebno je temeljito pripremiti uzorak aluminijske legure izrezivanjem ispitnog uzoraka, zalijevanjem u plastičnu masu (ukalupljivanjem), poliranjem i nagrivanjem površine.

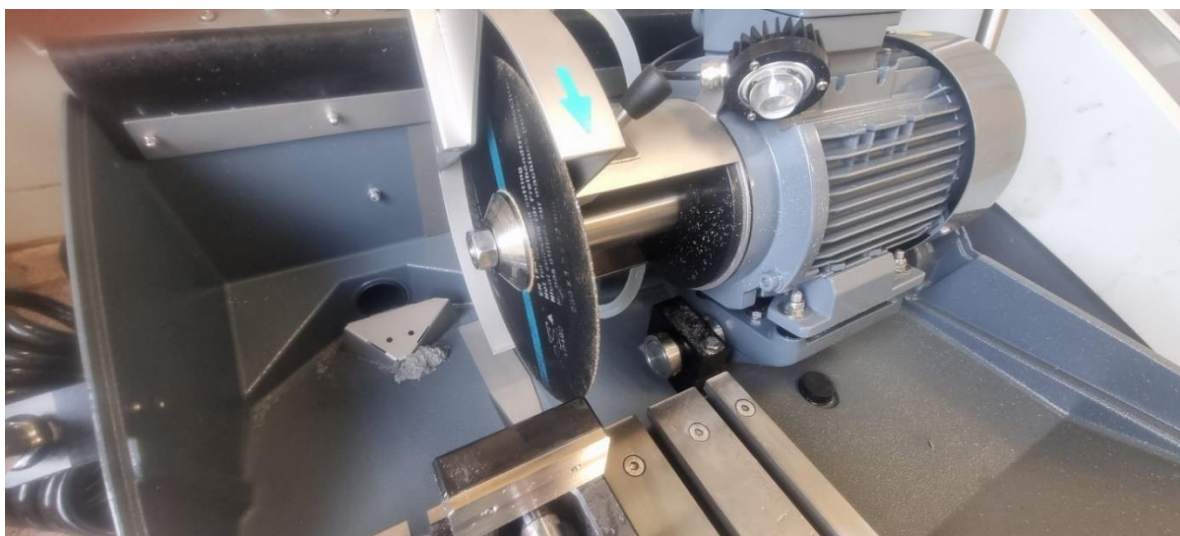
#### 5.3.1. Izrezivanje ispitnog uzorka

Rezanje uzoraka provodi se na uređaju Labotom-5 koji služi za rezanje materijala na željene/propisane dimezije za nastavak metalografskog ispitivanja. Na ovom uređaju može se rezati većina čvrstih i stabilnih (neeksplozivnih) materijala. Sastoji se od ručnog pomaka ploče za rezanje i recirkulacijskog spremnika za hlađenje. Recirkulacijsko sredstvo služi za hlađenje obratka kako nebi došlo do promjena u mikrostrukтури zbog zagrijavanja materijala, te za hlađenje alata i odvođenje odvojenih čestica. Rashladna tekućina je 4 % mješavina Cooli aditiva i vode (spremnik od 50 litara sa 48 litara vode i 2 litre Cooli aditiva).

Obrada odvajanjem čestica na uređaju započinje odabirom pravog oblika držača za obradak i stezanjem istog obratka na držač. Nakon stezanja uključuje se cirkulacija rashladnog sredstva, spušta se zaštitni poklopac i započinje rezanje. Pomicanje reznog alata odvija se ručno preko ručke za upravljanje, kako bi se moglo što prije reagirati i zaustaviti rezanje ukoliko se čuju neuobičajeni zvukovi ili javi bilo kakva druga situacija koja zahtijeva prekidanje obrade. Za rezanje se mogu koristiti samo ploče za rezanje promjera 250 milimetara. Za rezanje aluminijske koriste se ploče na bazi silicijevog karbida (SiC). Na slici 11 prikazan je izgled unutrašnjosti Labotom 5 uređaja s vidljivom reznom pločicom.

Nakon završenog rezanja, pomoću ručke alat se vraća u početnu poziciju te se ako je to potrebno obratku mijenja orijentacija. Dalje se ponavlja čitav postupak rezanja dok nije postignut vanjski oblik i dimezije koje su nam potrebne. Nakon postizanja traženog oblika čitav obradak se vadi iz uređaja i suši te priprema za druge korake obrade prije mikroskopiranja.

[6]



**Slika 12. Unutrašnjost Labotom 5 uređaja**

### **5.3.2 Vruće zalijevanje uzoraka**

Za vruće zalijevanje uzoraka u različite oblike kalupa u radu je korišten uređaj Struers CITOPRESS 30. Ovaj dio pripreme potreban je samo za uzorke koji se ne mogu samostalno postaviti u uređaj za poliranje. Uređaj CITOPRESS 30 sastoji se od kontrolne ploče, dva cilindra za zalijevanje uzoraka i zatvarača cilindra. Masa koja se upotrebljava je prikazana na slici, ClaroFast kao i pripadajući pribor, plastični ljevak i dvije špatulice od 10 i 20 mL. Prednosti ovog uređaja je automatska kontrola tlaka i temperature, količine doziranog materijala i vremena. Na slici 12 prikazani su uređaj CITOPRESS 30 i izgled uzorka nakon obavljenog vrućeg zalijevanja uzorka.

Prvi korak pripreme je otvaranje ventila za dovod vode za hlađenje i pokretanje uređaja Citopress 30. Nadalje potrebno je primijeniti sredstvo protiv ljepljenja AntiStick na postolje cilindra i na utor zatvarača cilindra. Zatim se uzorak postavlja na postolje cilindra te se se pritiskom na tipku cilindar spušta u uređaj. Potrebno je obaviti nanošenje masti Clarofast na uzorak te pritom pazeći na to da ga se potpuno prekrije ali bez da uzorak padne sa postolja. Zatvaranjem cilindra i čitavog uređaja Citopress 30 započinje proces vrućeg očvršuća Clarofast masti oko uzorka. Kad je proces završen potrebno je pažljivo skinuti zaliveni uzorak sa zatvarača cilindra, te je on spreman za daljnu obradu prije mikroskopiranja. [7]



**Slika 13. Vruće zalijevanje ispitnog uzorka: a) izgled uzorka, b) uređaj Struers CITOPRESS 30**

### 5.3.3. Brušenje i poliranje

Za obradu odvajanjem čestica brušenje i poliranje korištene je uređaj TEGRAMIN 30 proizvođača Struers. Kao i kod prijašnjih uređaja i kod ovog je potrebno prije početka bilo kakve obrade osigurati dovoljnu cirkulaciju vode za hlađenje.

Postupci i provedba brušenja i poliranja obrade na uređaju Tegramin 30 sastoji se od sljedećih koraka:

1. Uključiti uređaj i otvoriti ventil za cirkulaciju vode uz provjeru ispravnosti odvoda suspenzije u spremnik za prikupljanje.
2. Na zaslonu uređaja odabrati metodu koja se koristi za pripremu uzoraka po prethodno definiranim parametrima.
3. Zatvoriti glavni poklopac nakon što je uzorak pričvršćen u držaču i pokretanje postupka brušenja i poliranja.
4. Uređaj daje upozorenje o provednom postupku obrade. Nakon svake faze obrade metalografski uzorak treba izvaditi iz uređaja Tegramin 30 i dobro ga isprati pod mlazom tekuće vode, deterđentom i alkoholom te ga potom dobro osušiti pištoljem s komprimiranim zrakom kako grube odvojene čestice nebi ostale na površini tijekom idućih faza pripreme. Osim vađenja uzorka, potrebno je i izvaditi i promijeniti ploče za brušenje i poliranje. Prije odlaganja korištenih ploča one se moraju dobro isprati.



5. Nakon što je pripreme uzorka završena, uzorak se vadi iz uređaja te se ispire u mlazu vode i alkohola.

U tablicama 3 i 4 navedeni su tehnički parametri obrade na TEGRAMIN 30 uređaju za obradu brušenjem i poliranjem. [8]

**Tablica 3. Parametri obrade metalografskog uzorka brušenjem**

Faza rada	1. Grubo brušenje	2. Fino brušenje
Podloga	SiC #220	MD-Largo
Sredstvo	voda	DiaProAllegro/Largo – 9 µm
Brzina [rpm]	300/150	150/150
Sila [N]	16,5 N/uzorak	16,5 N/uzorak
Vrijeme [min]	1:30	4:30

**Tablica 4. Parametri obrade metalografskog uzorka poliranjem**

Faza rada	1. Poliranje	2. Završno poliranje
Podloga	MD-Mol	MD-Chem
Sredstvo	DiaProMol – 3 µm	OP-U suspenzija – 0,04 µm
Brzina [rpm]	150/150	150/150
Sila [N]	13,5 N/uzorak	10 N/uzorak
Vrijeme [min]	3:30	2:00

#### 5.5.4. Elektrolitičko nagrizanje površine

Za elektrolitičko poliranje i nagrizanje površine uzoraka aluminijskih legura korišten je uređaj Lectropol 5. Osnova elektrolitičkog poliranja i nagrizanja je anodno otapanje uzoraka u odgovarajućem elektrolitu, uz djelovanje odgovarajućeg katodnog materijala i gustoće struje. Metal (uzorak) se otapa pod utjecajem istosmjerne električne struje. Katoda je negativan pol, a anoda (uzorak) je pozitivan pol.

Uređaj Lectropol 5 sastoji se od sljedećih dijelova:

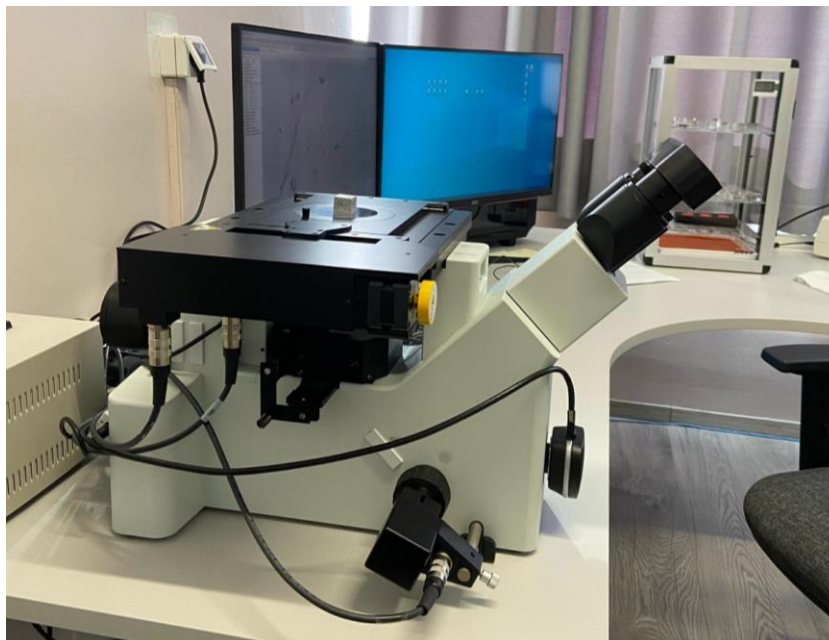
1. Kontrolna ploča
2. Glavni prekidač
3. Jedinica za poliranje/nagrizanje
4. Vanjska jedinica za nagrizanje

Postupak nagrivanja započinje postavljanjem uzorka poliranom površinom prema dolje na površinu koja je u kontaktu s katodom. Ako je osiguran dovoljan kontakt i dobra vodljivost između elektrona, može se započeti proces nagrivanja. Prije elektrolitičkog nagrivanja površina uzorka mora biti pravilno mehnički polirana. Nakon što je postupak nagrivanja završen uzorak se vadi iz uređaja Lectropol 5 i odmah se ispiru alkoholom i destiliranom vodom kako bi se spriječile daljnje reakcije na površini.

S nagrivanjem završava priprema uzorka za mikroskopiranje. Rezanje je omogućilo dovođenje uzorka u potrebne dimezije, zalijevanje lakše rukovanje, poliranje potrebnu kvalitetu površine za lakše nagrivanje, a nagrivanje je omogućilo da se na površini materijala pod mikroskopom lakše vide mikrostrukturne faze i granice zrna u materijalu. [9]

### 5.3.5. Svjetlosna mikroskopija

Metalografsko ispitivanje je destruktivna metoda koja može obuhvatiti makro i mikro istraživanje. U radu će se provesti samo analiza mikrostrukture valjanih i žarenih uzorka od aluminijske legure 5005. Analiza mikrostrukture provedena je kao završni dio ispitivanja u metalografskom laboratoriju. Za ispitivanje je korišten invertni mikroskop Olympus GX53 Olympus Stream Motion prikazan na slici 13.



**Slika 14. Mikroskop Olympus GX53 Olympus Stream Motion**

Svrha mikroskopskog ispitivanja je analiza strukturnih karakteristika aluminijske i aluminijskih legura koje uključuju određivanje:

- Veličine, rasporeda i vrste intermetalnih faza
- Veličine i oblika kristalnog zrna
- Vrste, rasporeda, veličine i količine nemetalnih uključaka
- Pukotina, pora i drugih nedostataka u strukturi materijala
- Rasporeda legirajućih elemenata i nečistoća u materijalu

Uzorci za ispitivanje mikrostrukture moraju biti savršeno pripremljeni, moraju biti svijetli, zrcalno glatkih površina, bez ostataka strojne obrade. Najučestalija povećanja za mikroskopiranje strukture aluminijevih legura su između 12.5x do 1000x. Software koji se koristi pri ispitivanju u radu omogućuje mjerenje osnovnih karakteristika mikrostrukture materijala kao što su:

- Veličina intermetalnih faza i strukturnih defekata kao što su inkluzije i pore
- Određivanje vrste greške
- Veličina kristalnog zrna prema ASTM E112
- Debljina reverznih blok pražnjenja i zona utjecaja topline
- DAS – veličina međudendričkog razmaka

U sklopu rješavanja zadatka završnog rada nije bilo potrebno izračunavati prethodno navedene parametre, već je samo provedana analiza oblika kristalnih zrna prije i nakon rekristalizacijskog žarenja. [10]

# **EKSPERIMENTALNI DIO**

## **6. PLAN POKUSA**

### **6.1. Plan statičkog vlačnog pokusa**

Uzorci materijala na kojima se promatra utjecaj rekristalizacijskog žarenja na oblik zrna u radu uzeti su u dva navrata za vrijeme trajanja procesa hladnog valjanja na V-22 valjku. Prvih 5 uzoraka je uzeto iz dijela procesa kad je materijal izašao s hladnog valjka nakon 2 prolaza kojima je debljina smanjena sa 6,0 mm na 3,3 mm. Nakon uzorkovanja materijal prolazi toplinsku obradu rekristalizacijskog žarenja legure, te nakon završenog žarenja ponovno je uzeto 5 uzoraka iste legure.

Na kidalici će biti ispitane vrijednosti vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja za te dvije skupine uzoraka te će se uspoređivati vrijednosti tih podataka i povezati njihova ovisnost o obliku zrna.

### **6.2. Plan ispitivanja tvrdoće i mikrostrukture**

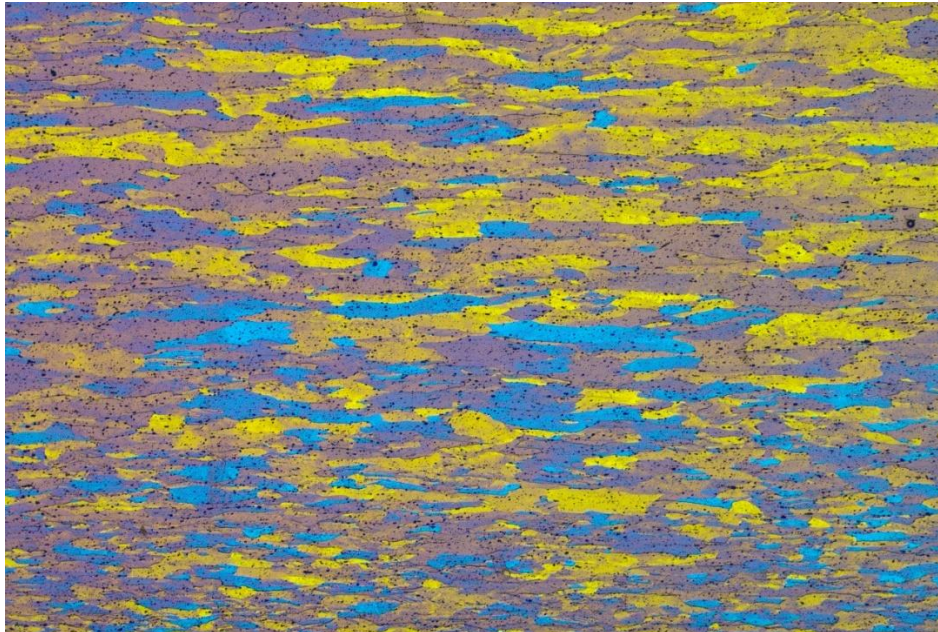
Osim vlačnog pokusa mjerit će se i tvrdoća 10 uzoraka legure aluminija 5005 pomoću tvrdomjera INOVATEST NEXUS 7501 prema metodi Brinell. Mjerenje tvrdoće dati će vrlo dobar pregled usporedbe utjecaja oblika zrna na tvrdoću i usporedbe stanja H18 i stanja H0.

Kako bi se vizualno pobliže pokazao izgled mikrostrukture aluminijske legure u metalografskom laboratoriju bit će obavljena priprema uzoraka prema prethodno opisanom postupku i analiza veličine i usmjerenosti zrna.

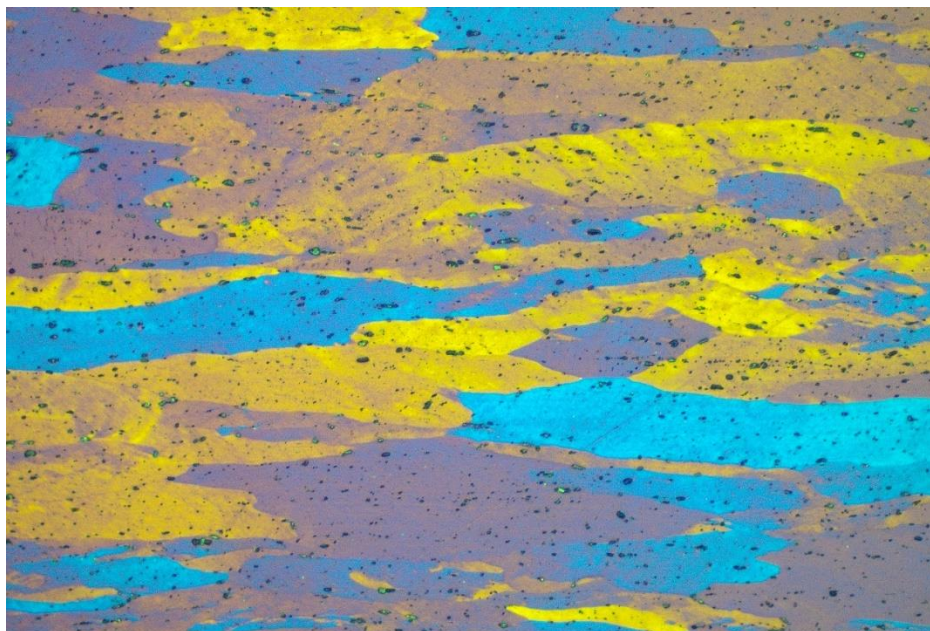
## 7. REZULTATI ISPITIVANJA

### 7.1. Analiza mikrostrukture svjetlosnom mikroskopijom

U metalografskom laboratoriju pripremljeni su uzorci za ispitivanje mikrostrukture. Na slici 14 prikazana je mikrostruktura aluminijeve legure 5005 nakon hladnog valjanja.



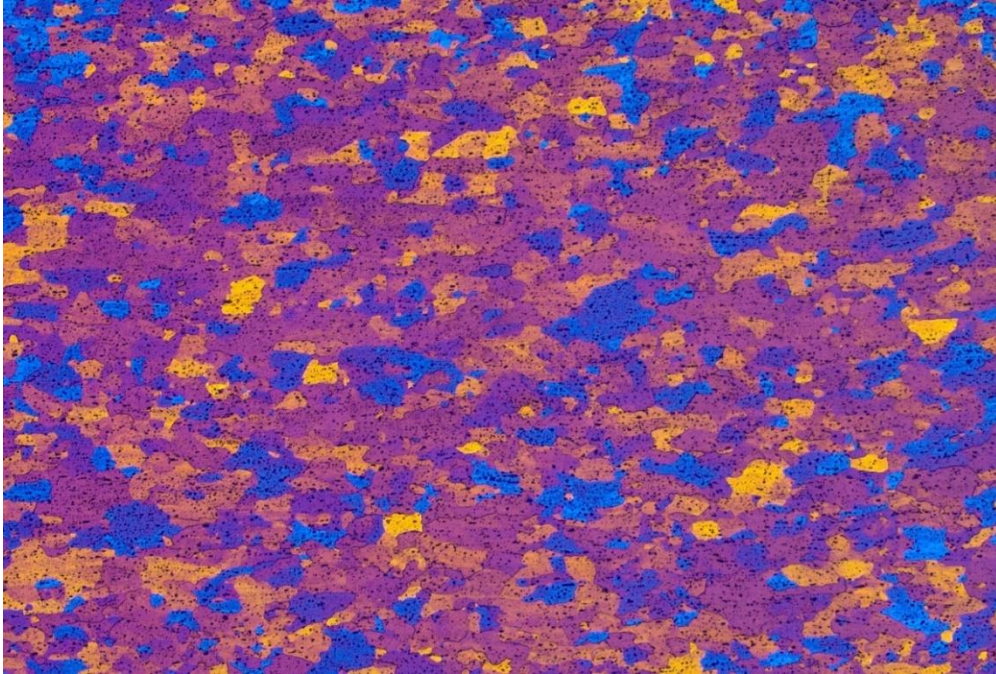
a)



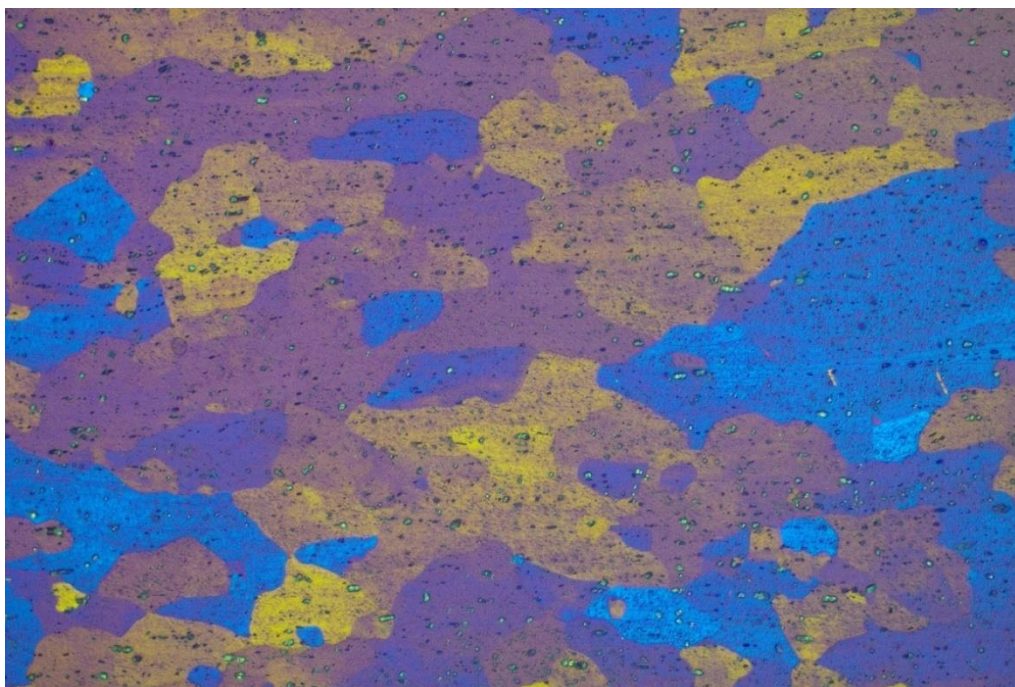
b)

**Slika 15. Mikrostruktura aluminijeve legure 5005 nakon hladnog valjanja snimljena invertnom mikroskopu s povećanjem: a) 5:1, b) 20:1**

Iz izgleda mikrostrukture vidljivo je izduženje kristalnih zrna u smjeru plastične deformacije, odnosno hladnog valjanja. Na slici 15 prikazana je mikrostruktura aluminijeve legure 5005 nakon rekristalizacijskog žarenja. Iz izgleda mikrostrukture je vidljivo da je došlo do ponovne kristalizacije i vraćanja prvotnog oblika i veličine zrna.



a)



b)

**Slika 15. Mikrostruktura aluminijeve legure 5005 nakon rekristalizacijskog žarenja snimljena invertnom mikroskopu s povećanjem: a) 5:1, b) 20:1**

## 7.2. Rezultati ispitivanja tvrdoće

Prvi korak ispitivanja mehaničkih svojstava aluminijske legure je ispitivanje tvrdoće. Ovo je važno jer je za ADR – TS – 100THZ 100kN kidalicu potrebno znati podatke o tvrdoći metala prije ispitivanja. Ispitivanja tvrdoće provedena su na uređaju INOVATEST NEXUS 7501. Provedeno je 5 mjerenja za H18 stanje – nakon plastične deformacije i 5 mjerenja za stanje H0 – nakon rekristalizacijskog žarenja. Vrijednosti tvrdoće prije i nakon rekristalizacijskog žarenja naveden su u tablici 5.

Tablica 5. Vrijednosti tvrdoće aluminijske legure 5005 prije i nakon rekristalizacijskog žarenja

R.b. mjerenja	Tvrdoća, HB	
	Stanje H18	Stanje H0
1.	54,8	32,4
2.	55,1	32,4
3.	54,8	32,6
4.	54,8	32,4
5.	54,1	32,6
<b>Srednja vrijednost tvrdoće</b>	54,72	32,48

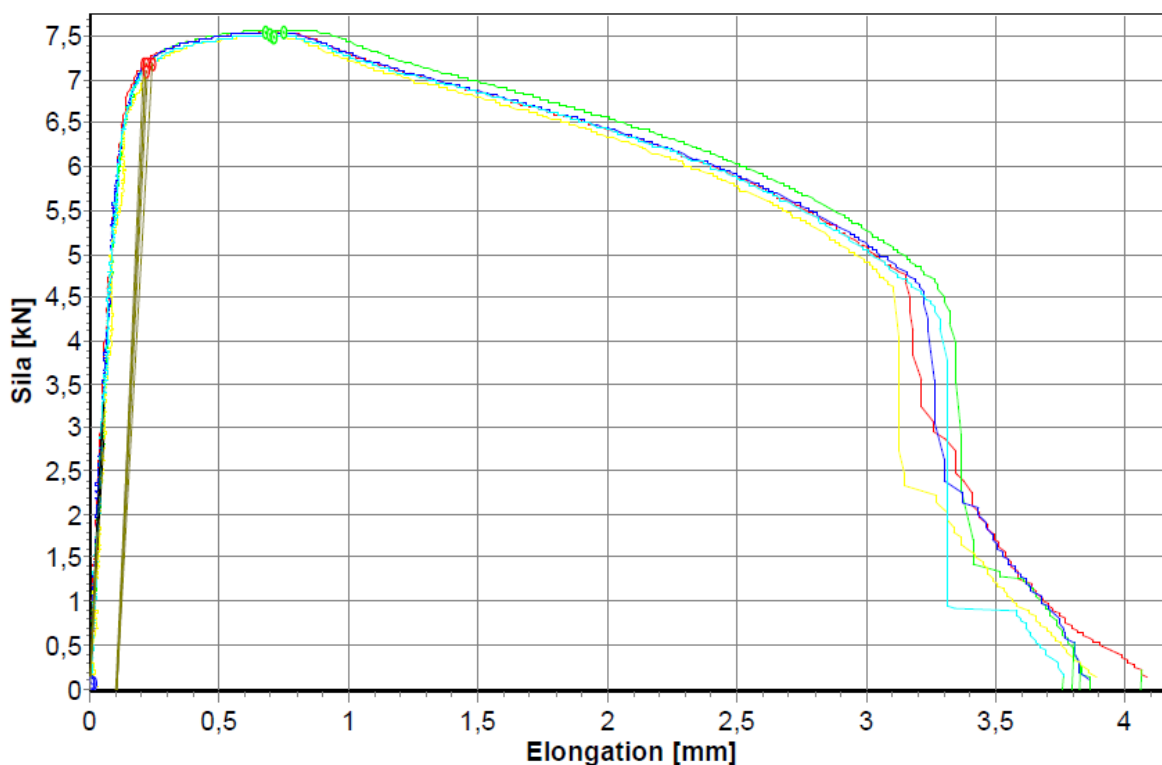
## 7.3. Rezultati stastičkog vlačnog ispitivanja

Na kidalici ADR – TS – 100THZ 100 kN obavljeno je 5 ispitivanja aluminijske legure 5005 nakon plastične deformacije na V-22 valjku za hladno valjanje. Površinsko stanje ispitnih uzoraka bilo je H14. Ispitivanje je provedeno prema normi ISO 6892-1: 2019 B. Ispitivanjem su dobiveni podaci o modulu elastičnosti  $E$ , konvencionalnoj granici razvlačenja  $R_{p0.2}$ , vlačnoj čvrstoći  $R_m$ , maksimalnoj sili  $F_m$  i produljenju  $A$  legure 5005.

Na slici 16 prikazan je dijagram sila-produljenje za svih 5 ispitivanja legure 5005 u stanju obrade H18, a u tablici 6 navedene su vrijednosti mehaničkih svojstava materijala za svih 5 ispitivanja. Sva mjerenja pokazuju mala međusobna odstupanja tako što nam potvrđuje dobru sljedivost rezultata mjerenja.



## Tensile Test metals ISO 6892-1 : 2019 B



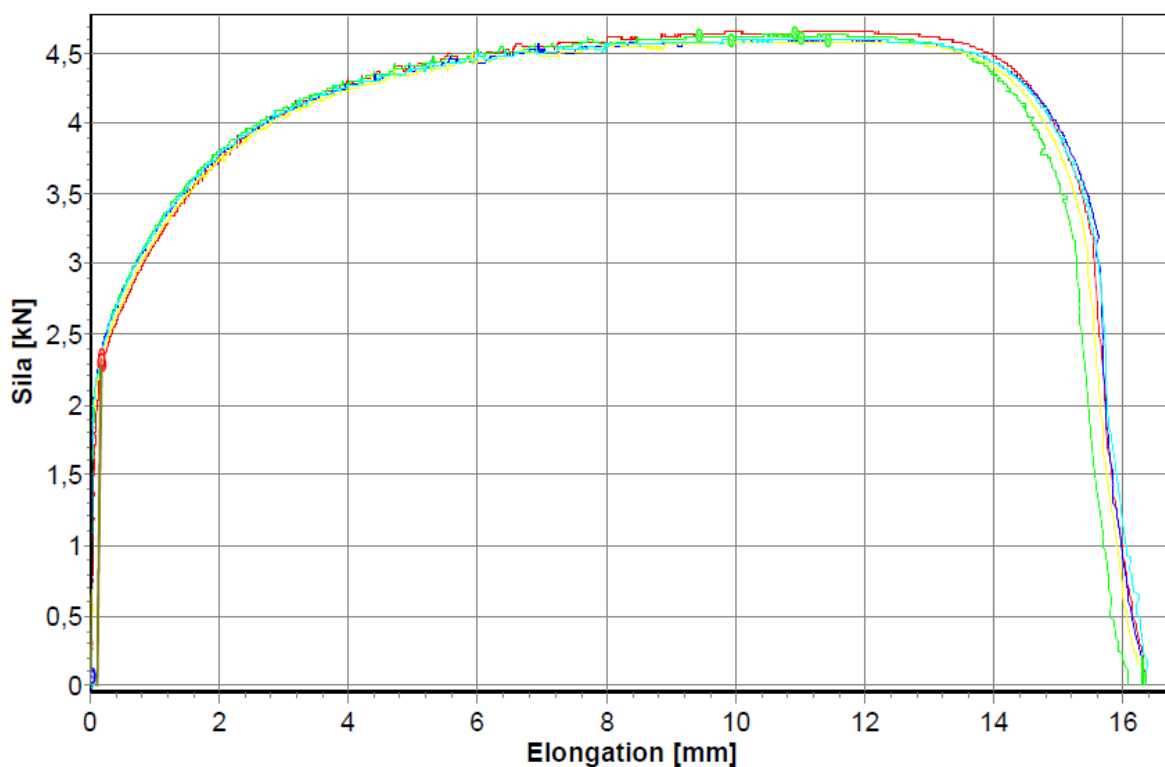
Slika 17. Dijagram sila-produljenje za 5 ispitivanja aluminijeve legure 5005 u stanju obrade H18

Tablica 6. Vrijednosti mehaničkih svojstava za 5 ispitivanja legure 5005 u stanju obrade H18

	TRJ	H.B	E MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Fm N	A %	L0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Deb. mm	Šir. mm
1	97789	54.8	82271	174	183	7547	8.1	50.04	41.35	3.304	12.514
2	97789	54.8	72368	174	183	7565	7.7	50.04	41.32	3.295	12.539
3	97789	54.8	75744	175	183	7542	7.5	50.34	41.14	3.285	12.523
4	97789	54.8	62735	175	183	7509	7.7	49.93	40.94	3.283	12.469
5	97789	54.8	76742	173	183	7511	7.5	49.82	41.04	3.293	12.463

Nakon deformiranja na hladnom valjku legura je podvrgnuta procesu toplinske obrade u trajanju od 4 sata pri 320 °C i 420 °C. Postignuto je stanje površine H0. Nakon ohlađivanja legure i prije nastavljanja obrade hladnog valjanja uzeto je još pet uzoraka za ispitivanje vlačnog pokusa. Ispitivanje je provedeno u istim uvjetima pod istim normama kao i prethodno. Slika 17 prikazuje dijagram sila-produljenje za 5 provedenih ispitivanja legure 5005 u stanju obrade H0, dok tablica 7 prikazuje vrijednosti mehaničkih svojstava za 5 ispitivanja legure 5005 u stanju obrade H0. Ovi rezultati također pokazuju jako dobru sljedivost.

## Tensile Test metals ISO 6892-1 : 2019 B



Slika 18. Dijagram sila-produljenje za 5 ispitivanja aluminijske legure 5005 u stanju obrade H0

Tablica 7. Vrijednosti mehaničkih svojstava za 5 ispitivanja legure 5005 u stanju obrade H0

	TRJ	H.B	E MPa	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Fm N	A %	L0 mm	S0 mm <sup>2</sup>	Deb. mm	Šir. mm
1	97789	32.4	32144	56	113	4655	32.7	49.82	41.03	3.287	12.482
2	97789	32.4	50855	57	113	4631	32.3	49.87	40.98	3.284	12.480
3	97789	32.4	68491	57	113	4603	32.6	50.00	40.86	3.276	12.473
4	97789	32.4	46531	57	113	4591	32.6	50.01	40.73	3.268	12.462
5	97789	32.4	53568	57	113	4612	32.8	49.85	40.77	3.279	12.433

Tablice 8 i 9 prikazuju izračunate srednje vrijednosti mehaničkih svojstava za aluminijsku leguru 5005 u H18 (tablica 8) i H0 (tablica 9) stanju.

Tablica 8. Srednje vrijednosti mehaničkih svojstava za aluminijsku leguru 5005 u stanju H18

Svojstvo	E, MPa	Rp0.2, MPa	Rm, MPa	A, %
Vrijednost	73972,0	174,2	183	7,7

**Tablica 9. Srednje vrijednosti mehaničkih svojstava za za aluminijevu leguru 5005 u stanju H0**

<b>Svojstvo</b>	E, MPa	R <sub>p0.2</sub> , MPa	R <sub>m</sub> , MPa	A, %
<b>Vrijednost</b>	50457,8	56,8	113	32,6

## 8. ZAKLJUČAK

Na temelju fotografija svjetlosne mikroskopije i ispitivanja mehaničkih svojstava vidljivi su efekti rekristalizacijskog žarenja primjenjenog na hladno deformiranu aluminijevu leguru 5005.

Srednja vrijednost tvrdoće aluminijeve legure 5005 iznosila je 54,72 HB prije rekristalizacijskog žarenja, dok je nakon žarenja bila smanjena na 32,48 HB. Prosječna vrijednosti vlačne čvrstoće u hladno valjanom stanju H18 bila je 183 N/mm<sup>2</sup>, a žarenjem je smanjena na 113 N/mm<sup>2</sup>. Istovremeno istezljivost A je povećana s vrijednosti 7,7 % u stanju H18 na vrijednost 32,6% u rekristalizacijski žarenom stanju H0.

U analiziranom postupku proizvodnje aluminijeve legure 5005 rekristalizacijsko žarenje je međukorak, nužan za povećanje obradivosti rezanjem i oblikovljivosti legure u hladno deformiranom stanju. Nakon rekristalizacijskog žarenja, legura 5005 je ponovno oblikovana valjanjem u jednom prolazu na debljinu tvrdoću, čvrstoću i istezljivost koje su tražene zahtjevom kupca.

Provednim ispitivanjima mehaničkih svojstava i analizom mikrostrukture potvrđen je povoljan i značajan utjecaj rekristalizacijskog žarenja na mikrostrukturu i svojstva obradljivosti deformiranjem aluminijeve legure 5005.

## LITERATURA

- [1] Totten G. E. i MacKenzie S. E.: Handbook of Aluminum: Volume 1 Physical Metallurgy and Processes, Marcel Dekker Inc., New York/Basel, 2003.
- [2] Brick R. M., Pense A. W., Gordon R. B.: Structure and Properties of Engineering Materials, McGraw-Hill College, 1977.
- [3] Interni dokument Impol-TLM, Opis Tehnoloških procesa na lokaciji Impol-TLM d.o.o,
- [4] Interni dokument Impol-TLM, Kontrolna metoda vlačno ispitivanje pločevina, 2022.
- [5] Interni dokument Impol-TLM, Kontrolna metoda merjenja trdote materiala, 2023.
- [6] Interni dokument Impol-TLM, Navodnilo za delo: Rezanje uzoraka na uređaju LABOTOM 5, 2024.
- [7] Interni dokument Impol-TLM, Navodnilo za delo: Vruće zalijevanje uzoraka na uređaju CITOPRESS 30, 2024.
- [8] Interni dokument Impol-TLM, Navodnilo za delo: Brušenje i poliranje uzoraka na uređaju TEGRAMIN 30, 2024.
- [9] Interni dokument Impol-TLM, Navodnilo za delo: Elektrolitsko nagrizanje na uređaju LECTROPOL 5, 2024.
- [10] Interni dokument Impol-TLM, Kontrolna metoda metalografske preiskave, 2024.