

Utjecaj brzine razvlačenja na pojavu Portevin-Le Chatelier efekta kod AlMg legure

Vučenović, Milica

Master's thesis / Diplomski 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:115:608927>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-08**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Milica Vučenović

DIPLOMSKI RAD

Sisak, veljača 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

Milica Vučenović

UTJECAJ BRZINE RAZVLAČENJA NA POJAVU PORTEVIN-LE
CHATELIER EFEKTA KOD $AlMg$ LEGURE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv.prof.dr.sc. Ivan Jandrlić
Stručni voditelj: Lorena Mrkobrada, mag.ing.met.

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada:
prof.dr.sc. Ljerka Slokar Benić - predsjednica
izv.prof.dr.sc. Ivan Jandrlić - član
doc.dr.sc. Tin Brlić – član
doc.dr.sc. Ivana Ivanić - zamjenski član

Sisak, veljača 2023.



KLASA: 602-04/22-04/14

URBROJ: 2176-78/22-04- 187

Sisak, 21. rujna 2022.

Temeljem točke IX. Naputka o diplomskom radu i diplomskom ispitu Pravilnika o studiranju na preddiplomskim studijima i diplomskom studiju Metalurškog fakulteta i članka 23. Statuta Metalurškog fakulteta, Fakultetsko vijeće na svojoj 16. redovitoj sjednici od 21. rujna 2022. godine (t. 3), a na prijedlog Povjerenstva za nastavu, donosi sljedeću

ODLUKU

o odobravanju teme, imenovanju mentora i stručnog voditelja i Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada

I.

Studentici diplomskog sveučilišnog studija *Metalurgija* **MILICI VUČENOVĆ** (0124124042) za mentora diplomskog rada pod naslovom "Utjecaj brzine razvlačenja na pojavu Portevin-Le Chatelier efekta kod AlMg legure" ("Influence of the stretching rate on the appearance of the Portevin-Le Chatelier effect in the AlMg alloy") 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 diplomskog rada u sastavu:

1. prof.dr.sc. Ljerka Šlokar Benić, 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 Milica Vučenović
- 5 x mentor, stručna voditeljica, članovi Povjerenstva
- 1 x Studentska referada
- 1 x Tajništvo
- 1 x pismohrana Fakultetskog vijeća
- 1 x pismohrana

Dekanica Metalurškog fakulteta

prof.dr.sc. Zdenka Zovko Brodarac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF METALLURGY

IME: Milica
PREZIME: Vučenović
MATIČNI BROJ: M-112/20

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:

UTJECAJ BRZINE RAZVLAČENJA NA POJAVU PORTEVIN-LE

CHATELIER EFEKTA KOD AlMg LEGURE

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

Sisak, veljača, 2023.

(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.

Ovaj rad je financiran Infrastrukturnim projektima „Centar za ljevarstvo – SIMET“, KK.01.1.1.02.0020 financiran sredstvima Europskog fonda za regionalni razvoj, Operativni program Regionalna konkurentnost 2007.-2013., Poziv „Priprema zalihe infrastrukturnih projekata za EFRR 2014.-2020. i VIRTULAB-Integrirani laboratorij za primarne i sekundarne sirovine, KK.01.1.1.02.0022, sufinanciran iz Europskoga fonda za regionalni razvoj putem Ograničenog poziva na dostavu projektnih prijedloga „Ulaganje u organizacijsku reformu i infrastrukturu u sektoru istraživanja, razvoja i inovacija“.

ZAHVALA

Zahvaljujem svom mentoru izv.prof.dr.sc. Ivanu Jandrliću na pomoći, savjetima i strpljenju koji su olakšali izradu ovog diplomskog rada i bili veliki poticaj.

Također, zahvaljujem stručnoj voditeljici Loreni Mrkobradi, mag.ing.met. na savjetima i pristupačnosti prilikom provođenja eksperimentalnog dijela rada koji su uvelike olakšali pisanje ovog diplomskog rada.

Svim djelatnicima Metalurškog fakulteta u Sisku zahvaljujem na stečenom znanju i iskustvu.

Svojim kolegicama i kolegama zahvaljujem na pomoći, podršci i lijepim uspomnama koje će me podsjećati na studentske dane.

Posebnu zahvalu dugujem svojoj obitelji i prijateljima koji su bili najveća podrška i oslonac tijekom cijelog školovanja.

SAŽETAK

Utjecaj brzine razvlačenja na pojavu Portevin-Le Chatelier efekta kod AlMg legure

Aluminij i legure na bazi aluminijske u današnje vrijeme su neizostavni materijali o kojima ovisi industrija na globalnom nivou. Određene aluminijske legure, poput AlMg legura pokazuju nehomogenu, lokaliziranu deformaciju pri određenim temperaturama i brzinama deformacije poznatu kao Portevin–Le Chatelier (PLC) efekt. Portevin–Le Chatelier efekt pridonosi smanjenju duktilnosti materijala i pojavi grešaka na površini materijala što je naravno nepoželjno i predstavlja nerješiv problem, stoga se sve veća pažnja obraća na proučavanje pojave PLC efekta kako bi se navedene posljedice koje PLC efekt ostavlja minimizirale ili u potpunosti uklonile. Kod proučavanja utjecaja brzine razvlačenja na pojavu Portevin – Le Chatelier efekta kod AlMg_{4,5} legure u ovom diplomskom radu korištene su metode digitalne korelacije slike i infracrvene termografije paralelno sa statičkim vlačnim ispitivanjem primjenom konstantnih brzina razvlačenja 10 mm/min, 20 mm/min i 50 mm/min te konstantnim porastom naprežanja od 5 MPa/s i 10 MPa/s. Metodama digitalne korelacije slike i termografije je ustanovljeno kako do pojave PLC efekta dolazi pri svim primijenjenim brzinama razvlačenja i porastima naprežanja te kako se PLC linije formiraju kroz cijeli period plastične deformacije sve do loma uzorka. Također, kako je i za očekivati, ustanovljeno je kako s porastom brzine razvlačenja dolazi i do porasta brzine deformacije.

Ključne riječi: Aluminij, AlMg legure, Portevin-Le Chatelier efekt, brzina razvlačenja, statičko vlačno ispitivanje, digitalna korelacija slike, termografija

ABSTRACT

Influence of the stretching rate on the appearance of the Portevin-Le Chatelier effect in the AlMg alloy

Aluminum and aluminum based alloys are nowadays irreplaceable materials on which industry worldwide depends. Certain aluminum alloys, such as AlMg alloys exhibit inhomogeneous, localized deformation at certain temperatures and strain rates known as the Portevin-Le Chatelier (PLC) effect. The Portevin-Le Chatelier effect contributes to the reduction of the materials ductility and the appearance of defects on the surface of material, which is obviously undesirable and represents an unsolvable problem. Therefore, more attention is paid to the study of the occurrence of the PLC effect, in order to minimize or completely eliminate the above consequences of the PLC effect. In this thesis, digital image correlation and infrared thermography methods were used simultaneously with static tensile testing in the study of the influence of stretching rate on the occurrence of the Portevin-Le Chatelier effect in AlMg alloy. The static tensile test was performed with constant stretching rates of 10 mm/min, 20 mm/min and 50 mm/min and with constant stress increase of 5 MPa/s and 10 MPa/s. Using the digital image correlation and infrared thermography methods it was found that the PLC lines formed throughout the entire period of plastic deformation until the specimen fractured. Also, as expected, it was found that as the stretching rate increased, the deformation rate also increased.

Key words: Aluminum, AlMg alloys, Portevin-Le Chatelier effect, stretching rate, tensile test, Digital Image Correlation, infrared thermography

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. Aluminij	2
2.1.1. Podjela legura na bazi aluminija	3
2.1.2. AlMg legure	5
2.2. Hladna plastična deformacija	6
2.2.1. Plastični tok	6
2.2.2. Mehanizmi deformacije	8
2.2.3. Dislokacije	9
2.2.4. Očvršćivanje AlMg legure deformacijom u hladnom stanju	10
2.3. Portevin-Le Chatelier efekt	12
2.3.1. Mehanizam nastanka Portevin-Le Chatelier efekta	13
2.3.2. Deformacije PLC efekta	14
2.3.3. Portevin-Le Chatelier efekt kod AlMg legura	17
2.4. Metode istraživanja Portevin-Le Chatelier efekta	18
2.4.1. Statičko vlačno ispitivanje	18
2.4.2. Digitalna korelacija slike	20
2.4.3. Infracrvena termografija	23
3. EKSPERIMENTALNI DIO	25
3.1. Priprema uzoraka	25
3.2. Statičko vlačno ispitivanje	26
3.3. Analiza metodom digitalne korelacije slike	27
3.4. Analiza metodom termografije	28
4. REZULTATI I RASPRAVA	31
4.1. Rezultati statičkog vlačnog pokusa	31
4.2. Rezultati DIC i termografske analize tijekom ispitivanja uzoraka	33
4.3. Utjecaj promjene brzine razvlačenja na brzinu PLC linija	41
5. ZAKLJUČAK	45
6. LITERATURA	46
ŽIVOTOPIS	49

POPIS SLIKA

Slika 1. Metalni aluminij [7].....	2
Slika 2. Primjer upotrebe aluminijske legure u arhitekturi (<i>Luma Arles Tower, Francuska</i>) [9]	3
Slika 3. Podjela aluminijskih legura prema načinu proizvodnje i načinu očvršćivanja [10].....	4
Slika 4. Shematski prikaz translacijskog klizanja, (a) početno stanje, (b) mehanizam translacijskog klizanja [24]	8
Slika 5. Shematski prikaz dvojnikanja, (a) početno stanje, (b) mehanizam dvojnikanja [24]	9
Slika 6. (a) Idealan kristal, (b) rubna dislokacija, (c) zavojna dislokacija [26]	10
Slika 7. Frank-Readov izvor [27]	10
Slika 8. Utjecaj hladne plastične deformacije na promjenu svojstava [28]	11
Slika 9. TEM prikaz gustoće dislokacija nakon istog stupnja deformacije kod (a) čistog aluminijskog, (b) aluminij-magnezij legure [29]	11
Slika 10. Ilustrativni prikaz nazubljene krivulje [34]	12
Slika 11. Interakcija dislokacija s otopljenim elementima [36].....	13
Slika 12. Raspon temperature i brzine deformacije pri kojima dolazi do pojave nestabilnog plastičnog toka kod AlMg legure [36]	14
Slika 13. Klasifikacija PLC linija [39].....	14
Slika 14. Gibanje PLC linija kroz aluminijsku leguru [40]	15
Slika 15. Shematski prikaz gibanja linija tipa A i karakterističan izgled nazubljenja.....	15
Slika 16. Shematski prikaz gibanja linija tipa B i karakterističan izgled nazubljenja	16
Slika 17. Shematski prikaz gibanja linija tipa C i karakterističan izgled nazubljenja	16
Slika 18. PLC nazubljenja kod različitih temperatura (a) i kod različitih brzina deformacije (b) [2].....	17
Slika 19. Epruveta s označenim karakterističnim vrijednostima [45]	18
Slika 20. Dijagram sila-produljenje [45]	19
Slika 21. Shematski prikaz ispitivanja metodom digitalne korelacije slike (2D) [47]	21
Slika 22. Prikaz metode digitalne korelacije slike [49]	22
Slika 23. Shematski prikaz mjerenja metodom infracrvene termografije [51].....	23
Slika 24. Standardna epruveta aluminijske legure (AlMg4,5) za statičko vlačno ispitivanje .	25
Slika 25. Epruveta s nanesenim crnim mat premazom	26
Slika 26. Epruveta s nanesenim bijelim točkicama (markerima)	26
Slika 27. Kidalica Hegewald & Peschke inspekt 100.....	27
Slika 28. Položaj digitalne kamere tijekom ispitivanja.....	28
Slika 29. Termalna kamera Jenoptik VarioCAM® M82910.....	29

Slika 30. Položaj termalne kamere tijekom ispitivanja.....	29
Slika 31. Sučelje programa IRBIS3 Professional	30
Slika 32. Dijagram naprezanje-deformacija pri konstantnoj brzini razvlačenja 10 mm/min ..	31
Slika 33. Dijagram naprezanje-deformacija pri konstantnoj brzini razvlačenja 20 mm/min ..	31
Slika 34. Dijagram naprezanje-deformacija pri konstantnoj brzini razvlačenja 50 mm/min ..	32
Slika 35. Dijagram naprezanje-deformacija s konstantnim porastom naprezanja 5 MPa/s.....	32
Slika 36. Dijagram naprezanje-deformacija s konstantnim porastom naprezanja 10 MPa/s...	33
Slika 37. Prikaz DIC analize pri razvlačenju brzinom 20 mm/min	34
Slika 38. Prikaz DIC analize pri razvlačenju brzinom 50 mm/min	34
Slika 39. Prikaz termografske analize pri razvlačenju brzinom 20 mm/min.....	35
Slika 40. Prikaz termografske analize pri razvlačenju brzinom 50 mm/min.....	35
Slika 41. Brzina deformacije pri brzini razvlačenja 10 mm/min.....	36
Slika 42. Brzina deformacije pri brzini razvlačenja 20 mm/min.....	36
Slika 43. Brzina deformacije pri brzini razvlačenja 50 mm/min.....	37
Slika 44. Brzina deformacije pri konstantnom prirastu sile.....	37
Slika 45. Usporedni prikaz promjene brzine deformacije u ovisnosti o brzini razvlačenja	38
Slika 46. Temperaturne promjene pri različitim brzinama razvlačenja.....	39
Slika 47. Usporedba brzine deformacije s promjenom temperature pri brzini razvlačenja 10 mm/min	39
Slika 48. Usporedba brzine deformacije s promjenom temperature pri brzini razvlačenja 20 mm/min	40
Slika 49. Usporedba brzine deformacije s promjenom temperature pri brzini razvlačenja 50 mm/min	40
Slika 50. Dijagrami naprezanje-vrijeme s označenim mjestima mjerenja brzine PLC linija ..	41
Slika 51. Primjer očitavanja vremena i pozicije linije pri određivanju brzine PLC linija.....	42
Slika 52. Ovisnost brzine PLC linija o brzini razvlačenja, a) brzine PLC linija pri različitim brzinama ispitivanja i različitim stupnjevima deformacije, b) prosječne brzine PLC linija pri različitim stupnjevima razvlačenja.....	43
Slika 53. Vizualni prikaz DIC analize te razlike u debljini linija u ovisnosti o brzini razvlačenja.....	44

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovna mehanička i fizikalna svojstva aluminija [8]	3
Tablica 2. Označavanje i primjena aluminijskih legura za gnječenje prema EN 573-3 [6,10,11,12]	4
Tablica 3. Označavanje i primjena aluminijskih legura za lijevanje EN 1706 [12,13,14].....	5
Tablica 4. Uvjeti ispitivanja	25

1. UVOD

Aluminij i aluminijske legure u posljednjih nekoliko godina u industrijskoj primjeni (zrakoplovna industrija, automobilska industrija, raketna tehnika, prehrambena industrija, građevina...) pronalaze svoju sve veću upotrebu zbog poželjnih svojstava kao što su dobra električna vodljivost, dobra zavarljivost i otpornost prema koroziji te prihvatljiva cijena. Također, još jedno poželjno svojstvo je mala gustoća aluminijske legure čime njihova primjena u industriji prijevoznih sredstava dovodi do smanjenja mase i povećanja energetske efikasnosti što je u današnje vrijeme vrlo bitno [1].

Kod nekih vrsta čelika i aluminijskih legura, a posebice kod AlMg legura, pri određenim uvjetima plastične prerade dolazi do nestabilnosti plastičnog toka što uzrokuje nehomogenu deformaciju. Te pojave u literaturi su poznate kao Lüdersove linije i Portevin-Le Chatelier efekt. Kod tehnički važnih AlMg legura najčešće se javlja Portevin-Le Chatelier efekt. Oblikovanje ovih legura s pojavom nehomogenih, lokaliziranih deformacija uglavnom rezultira lošijim mehaničkim svojstvima i izraženijim zamorom materijala i formiranja pukotina i loma, što je naravno nepoželjno jer se teži maksimalnom iskorištavanju svojstava određene legure [2].

Portevin-Le Chatelier efekt naziv je dobio prema zajedničkim doprinosima znanstvenika Portevina i Le Chateliera. PLC je posljedica dinamičkog deformacijskog starenja (eng. *Dynamic Strain Aging*) do kojeg dolazi prilikom interakcije pokretnih dislokacija s atomima otopljenog elementa pri čemu atomi otopljenog elementa predstavljaju prepreku gibanja dislokacijama. Portevin-Le Chatelier efekt je u najvećoj mjeri ovisan o brzini deformacije i temperaturi te se obično u literaturi klasificira prema izgledu nazubljenih krivulja na dijagramima naprežanje-deformacija koje su karakteristične za ovu pojavu (tip A, tip B, tip C, tip D, tip E) [2-4].

Danas je uz svakodnevni razvoj tehnologije, omogućeno detaljnije proučavanje te detaljniji uvid u Portevin-Le Chatelier efekt uz pomoć različitih metoda.

Uz pomoć kidalice za statički vlačni pokus, vrši se statičko vlačno ispitivanje koje nam daje podatke o istezanju, granici razvlačenja i vlačnoj čvrstoći. Statičkim vlačnim ispitivanjem dobiva se krivulja očvršćivanja iz koje je moguće dobiti i zaključke o samom plastičnom toku materijala. Uslijed uočenih nestabilnosti u krivuljama očvršćivanja, posljednjih se nekoliko godina istraživanja usmjeravaju na zonu deformacije i sam tok materijala tijekom statičkog vlačnog ispitivanja. Promatranje i analiza promjena u zoni deformacije ostvaruje se primjenom metode digitalne korelacije slike (eng. *Digital Image Correlation*) i termografske analize. Navedene metode omogućavaju bolji uvid u PLC efekt i njegovu pojavu.

Ekperimentalna istraživanja u ovom diplomskom radu provedena su statičkim vlačnim ispitivanjem uz praćenje deformacije pomoću metode digitalne korelacije slike i termografske analize. Cilj istraživanja je bio utvrditi utjecaj promjene brzine deformacije na pojavu Portevin-Le Chatelier efekta kod AlMg4.5 legure.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Aluminij

Aluminij je nemagnetičan metal niske gustoće ($2,7 \text{ g/cm}^3$) što ga čini približno trostruko lakšim od čelika. Temperatura tališta aluminija iznosi $660,32 \text{ }^\circ\text{C}$ te kristalizira u plošno centriranoj kubičnoj rešetci (FCC). U prirodi nije samorodan već se pronalazi kao oksid u spojevima s oksidima željeza, vanadija itd. Metalni aluminij (slika 1) je prvi put izoliran 1827-e godine od strane njemačkog kemičara Friedricha Wohlera. Zbog povoljnog omjera čvrstoće i gustoće koristi se u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji, pogotovo u posljednje vrijeme kada se teži smanjenu masu i povećanju energetske učinkovitosti. Na svojoj površini stvara oksidni transparentni sloj debljine $0,01 \text{ }\mu\text{m}$ koji ga štiti od korozije. Oksidni sloj se u slučaju oštećenja automatski nadomješta novim. Zbog svojih izrazito reflektirajućih svojstava, aluminij reflektira oko 90 % infracrvenog i ultraljubičastog zračenja. Također, aluminij ima dobru toplinsku i električnu vodljivost te u elektrotehnici sve češće zamjenjuje bakar. Pogodan je za plastičnu preradu deformiranjem u hladnom ili toplom stanju zbog dobre duktilnosti. Aluminij nije toksičan po ljudsko zdravlje pa se koristi i u industriji ambalaže, za izradu folija i sl. Može se koristiti i u dekorativne svrhe zbog svog sjaja, ali se u te svrhe koristi samo aluminij visoke čistoće [5,6].



Slika 1. Metalni aluminij [7]

Do kraja 19-og stoljeća na aluminij se gledalo kao danas na plemenite metale jer se kao redukcijsko sredstvo koristio metalni kalij koji je bio izrazito visoke cijene, a samim time i proizvodnja aluminija. Problem je riješen kada su 1886-e godine C.M. Hall i P. Heralut otkrili da se talište glinice, koja se dobije Bayerovim postupkom, snižava dodatkom kriolita te se potom elektrolitičkom redukcijom dobije aluminij, stoga se može se reći kako je krajem 19-stoljeća započela industrijska proizvodnja aluminija. Primarni aluminij i dalje se najčešće dobiva navedenim postupkom, no kako se u današnje vrijeme gleda na sve veće smanjenje štetnog utjecaja na okoliš, koriste se i metode za dobivanje sekundarnog aluminija, odnosno pretaljivanjem aluminijskog otpada, recikliranjem. Pritom treba naglasiti činjenicu da se aluminij može konstantno reciklirati čime se automatski utječe na smanjenje potrošnje energije [5,6].

Primjenu aluminija kao jednog od najvažnijih inženjerskih materijala određuju njegova svojstva prikazana tablicom 1 od kojih se kao najpoželjnija navode omjer gustoće i čvrstoće, omjer gustoće i električne vodljivosti te antikorozivna svojstva.

Tablica 1. Osnovna mehanička i fizikalna svojstva aluminija [8]

Mehaničko/fizikalno svojstvo	Vrijednost	Mjerna jedinica
Gustoća, ρ	2698	kg/m ³
Talište	660,32	°C
Vrelište	2056	°C
Toplinski kapacitet, c_p	897	J/kg×K
Električni otpor, ρ	26,548	10 ⁻⁹ Ωm
Modul elastičnosti, E	69000	MPa
Vlačna čvrstoća, R_m	40 – 60	MPa
Tvrdoća	20 - 40	HV

Aluminij je poželjan materijal koji je otporan na niz atmosferskih utjecaja stoga je i spektar njegove primjene opširan, no podložan je djelovanju lužina. Uz to ima vrlo malu čvrstoću i granicu razvlačenja pa se u građevinarstvu koriste različite legure kojima se smanjuju nedostaci aluminija. Elektrolitički najčišći aluminij (čistoće 99,99%) koristi se za izradu kemijske aparature dok se tehnički čist aluminij koristi u industriji za proizvodnju aluminijskih legura [5,6,8].

2.1.1. Podjela legura na bazi aluminija

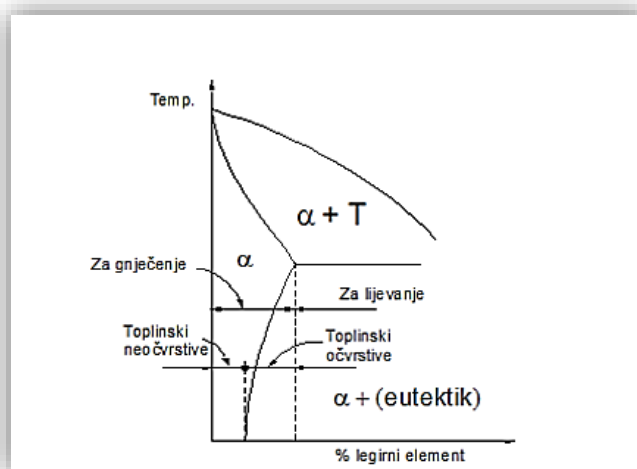
Spektar upotrebe aluminijskih legura je vrlo opširan, a u 20-om stoljeću razvijeno je preko 600 legura aluminija koje se koriste u brodogradnji, građevini, arhitekturi (slika 2), automobilskoj industriji i nizu drugih grana industrije, ali i u svakodnevnom životu. Cilj legiranja je prilagoditi i poboljšati mehanička i kemijska svojstva ovisno o primjeni konačnog proizvoda te zahtjevima [5,8].



Slika 2. Primjer upotrebe aluminijske legure u arhitekturi (*Luma Arles Tower, Francuska*) [9]

Aluminijske legure dijele se prema Europskoj normi na legure za gnječenje i legure za lijevanje. Kod legura za gnječenje udio legirajućeg elementa je niži u odnosu na legure za lijevanje kao što

je prikazano slikom 3. Nadalje se dijele prema načinu očvršćivanja na toplinski očvrstive (očvršćivanje precipitacijom) i toplinski neočvrstive legure (očvršćivanje deformacijom u hladnom stanju). Granicu između toplinski očvrstivog i toplinski neočvrstivog stanja predstavlja topljivost intermetalnog spoja ili legirajućeg elementa pri sobnoj temperaturi [10,11,12].



Slika 3. Podjela aluminijevih legura prema načinu proizvodnje i načinu očvršćivanja [10]

Legure za gnječenje – prema Europskoj normi (EN 573-3) dijele se u 9 serija (tablica 2). Legure za gnječenje su pogodne za plastičnu preradu valjanjem, istiskivanjem, izvlačenjem itd. pomoću kojih se dobiju žice, trake, folije, limovi, cijevi,... Legure serija 2xxx, 6xxx, 7xxx i 8xxx su toplinski očvrstive, dok su legure serija 1xxx, 3xxx, 4xxx i 5xxx toplinski neočvrstive [10,11]

Tablica 2. Označavanje i primjena aluminijevih legura za gnječenje prema EN 573-3 [6,10,11,12]

Legirajući element	Oznaka	Primjena
Aluminij (Al)	1xxx	Industrija ambalaže, električni vodiči
Bakar (Cu)	2xxx	Zrakoplovna i automobilska industrija
Mangan (Mn)	3xxx	Građevinarstvo, oprema za kemijsku i prehrambenu industriju
Silicij (Si)	4xxx	Zavarivanje (elektrode), klipovi
Magnezij (Mg)	5xxx	Automobilska industrija i brodogradnja
Magnezij i Silicij (Mg i Si)	6xxx	Automobilski limovi, cijevi u industriji nafte, građevinarstvo
Cink (Zn)	7xxx	Zrakoplovna i automobilska industrija
Ostali elementi (Li, Sn,...)	8xxx	Izmjenjivači topline, svemirka tehnologija
Nedodijeljena skupina	9xxx	/

Legure za lijevanje – prema Europskoj normi (EN 1706) također se dijele u 9 skupina kao što je prikazano tablicom 3. Kada je riječ o mehanizmu očvršćivanja, serije 1xx.x, 4xx.x i 5xx.x su toplinski neočvrstive, a 2xx.x, 3xx.x, 7xx.x i 8xx.x su toplinski očvrstive [12,13,14].

Tablica 3. Označavanje i primjena aluminijskih legura za lijevanje EN 1706 [12,13,14]

Legirajući element	Oznaka	Primjena
Aluminij (Al)	1xx.x	Kemijska aparatura
Bakar (Cu)	2xx.x	Svemirska tehnologija, zrakoplovna industrija
Silicij i bakar i/ili magnezij (Si, Cu, Mg)	3xx.x	Automobilska industrija (klipovi, cilindri)
Silicij (Si)	4xx.x	Visokotlačni lijev, nosači ograda
Magnezij (Mg)	5xx.x	Zavarivanje, arhitektura
Nedodijeljena skupina	6xx.x	/
Cink (Zn)	7xx.x	Rudarska oprema
Kositar (Sn)	8xx.x	Ležajevi
Nedodijeljena skupina	9xx.x	/

2.1.2. AlMg legure

Kod legura za gnječenje to su serije legura 5xxx i 6xxx. Prethodno je navedeno da je kod serije 5xxx glavni legirajući element magnezij, a kod serije 6xxx magnezij i silicij. AlMg legure za gnječenje najčešće se proizvode lijevanjem aluminijskih blokova postupkom direktnog hlađenja koji su namijenjeni daljnjoj plastičnoj preradi kao što su valjanje, ekstruzija itd. Pri proizvodnji AlMg legura, greške koje se mogu pojaviti su mikrosegregacije i poroznost, a kao što je poznato one pogoršavaju mehanička svojstva legure.

Mikrosegregacije je moguće smanjiti homogenizacijskim žarenjem, no poroznost zaostaje. Na temelju istraživanja, zaključeno je kako magnezij utječe na pojavu poroznosti kod AlMg legura, pri čemu se poroznost povećava s povećanjem sadržaja magnezija. Do 2 % sadržaja, magnezij ne ostavlja toliki utjecaj, no s povećanjem od 2 do 6 % opasnost od pojave poroznosti raste [15,16]. Također, vrlo je bitno paziti na sadržaj magnezija jer s njegovim povećanjem opada plastičnost legure te se povećava opasnost od interkristalne korozije [17]. Sadržaj magnezija do 4,5 % povećava čvrstoću AlMg legura dok sadržaj viši od navedenog dovodi do izdvajanja intermetalnih faza na granicama zrna što dovodi do pojave interkristalne korozije. Magnezij također utječe i na granicu razvlačenja koja je kod čistog aluminijskog niskog, no dodatkom magnezija kao legirajućeg elementa, granica razvlačenja se povećava [18]. Prema teoriji, maksimalan udio magnezija kod legura za gnječenje ne smije prelaziti 7 %, a kod legura za lijevanje 12 %, no u praksi su ti udjeli znatno niži [17].

Karakteristike AlMg legura za gnječenje:

- a) **serija 5xxx** - legure serije 5xxx čest su predmet istraživanja zbog svojih dobrih svojstava kao što su dobar odnos duktilnosti i čvrstoće, otpornosti na koroziju te dobrom sposobnosti oblikovanja deformacijom i dobrom zavarljivosti. Sve češće su u upotrebi zbog navedenog svojstva otpornosti prema koroziji posebice u morskoj vodi i alkalnim otopinama stoga se koriste u brodogradnji, ali i u prehrambenoj i automobilskoj industriji [6,17].
- b) **serija 6xxx** – legure serije 6xxx, gdje je uz magnezij glavni legirajući element i silicij imaju visoke vrijednosti čvrstoće i dobru duktilnost, ali nižu otpornost prema koroziju u odnosu na seriju 5xxx. Specifično polje primjene je građevinski sektor [6].

Kod aluminijskih legura za lijevanje, konačni produkt lijevanja su odljevci različitih dimenzija i oblika. Tehnologije lijevanja su različite pa se prilikom lijevanja mogu koristiti jednokratni i višekratni kalupi te tlačni i precizni lijev [19].

Karakteristike AlMg legura za lijevanje:

- a) **serija 3xx.x** – udio magnezija u ovoj seriji legura je nizak i kreće se od 0,3 % do 0,6 %, dok je udio silicija od 5 % do 22 %, a bakra do maksimalno 4,5 %. Uz silicij, bakar i magnezij se dodaju zajedno ili odvojeno u talinu. Ove legure imaju dobru čvrstoću i tvrdoću, imaju mogućnost precipitacijskog očvršćivanja i toplinski su obradive, čime se dodatno povećavaju čvrstoća i tvrdoća [6].
- b) **serija 5xx.x** – prilikom lijevanja udio nečistoća mora biti minimalan kako bi se postigle dobre vrijednosti čvrstoće i žilavosti. Također su otporne na koroziju kao i serija 5xxx legura za gnječenje. Pogodne su za strojnu obradu i zavarivanje te se koriste u arhitekturi [6,19].

2.2. Hladna plastična deformacija

Plastična deformacija je po definiciji promjena oblika i dimenzija materijala pod utjecajem vanjske sile bez razaranja komada i mogućnosti povratka u prvobitno stanje. Na atomskoj razini do plastične deformacije dolazi kidanjem atomskih veza prilikom čega dolazi do premještanja atoma iz njihovog prvobitnog položaja, stvaranja novih veza i zauzimanja novog ravnotežnog položaja. Plastičnu deformaciju dijelimo na toplu i hladnu. Razlika između tople i hladne deformacije je prvenstveno u temperaturi. Topla plastična deformacija provodi se iznad temperature rekristalizacije, koja je specifična za svaki materijal, a hladna plastična deformacija se provodi ispod temperature rekristalizacije. Neki od tehnoloških procesa plastične deformacije su valjanje, izvlačenje, sabijanje itd. [20].

2.2.1. Plastični tok

Plastičnosti metalnih materijala, prema teoriji oblikovanja deformiranjem pristupa se dvjema teorijama, a to su: fizikalna i fizikalno kemijska teorija deformacije te mehaničko matematička teorija oblikovanja deformiranjem.

Fizikalna i fizikalno kemijska teorija proučava mehanizam plastičnog oblikovanja, vanjski utjecaj na plastičnost, fazna stanja tijekom oblikovanja deformiranjem, povezanost plastičnosti s kemijskim i fizikalnim promjenama te fizikalne uvjete elastičnog i plastičnog stanja kristala [20].

Mehaničko matematičkom teorijom oblikovanja deformiranjem opisuju se navedeni procesi te se proučavaju naprezanja i njihova raspodjela u zoni deformacije. Također, postavljaju se određeni uvjeti, uvjeti plastičnog tečenja i zakoni tečenja te uvjeti ravnoteže [20].

Djelovanjem sile na neko metalno tijelo može doći do plastične (nepovratne) i elastične (povratne) deformacije. Granicu između navedenih čini granica razvlačenja (granica tečenja, R_e). Da bi došlo do plastične deformacije, tangencijalna (smična) naprezanja moraju dostići vrijednost pomoću koje će savladati unutrašnji otpor deformaciji na granicama zrna ili na kliznim ravninama. Pritom mora biti zadovoljen sljedeći uvjet: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. U suprotnom, kada bi sva glavna naprezanja bila jednakih vrijednosti, tangencijalna naprezanja bi bila jednaka nuli te do tečenja materijala, a ujedno i plastične deformacije ne bi ni došlo [21].

Kako bi došlo do plastičnog tečenja materijala potrebno je zadovoljiti sljedeće uvjete:

- a) jednoosno stanje naprezanja** – kada glavno djelujuće naprezanje (σ_1) postigne kritičnu vrijednost (k_f) dolazi do tečenja materijala. Vrijedi za tlačna i vlačna opterećenja, a može se zapisati kao:

$$\sigma = \sigma_1 = \left| \frac{F}{A} \right| = k_f \quad (1)$$

gdje je : σ - naprezanje,

σ_1 – glavno normalno naprezanje,

k_f – kritična vrijednost [21]

- b) višeosno stanje naprezanja** – u realnim uvjetima materijal se nalazi u višeosnom stanju naprezanja, a do plastičnog tečenja će doći utjecajem naprezanja po svim osima. Nekoliko je teorija kojima se opisuje višeosno stanje naprezanja, no teorija smičnih naprezanja (Tresca, Mohr) i teorija energije promjene oblika (Hubert, von Mises, Hencky) su najčešće korištene.

Teorija smičnih naprezanja govori da će u materijalu plastična deformacija nastupiti onda kada najveće smično naprezanje (τ_{max}) postigne određenu kritičnu vrijednost. Uvjet tečenja glasi:

$$|\tau_{max}| = k \quad (2)$$

gdje je: τ_{max} – najveće smično naprezanje

k – kritična vrijednost

Mohrovom kružnicom moguće je prikazati stanje naprezanja u ravnini. U ovom slučaju je $\sigma_2 = 0$, najmanje naprezanje je σ_3 , a najveće σ_2 i tada vrijedi:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = k \quad (3)$$

Dobije se uvjet tečenja prema teoriji smičnih naprezanja:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = k_f \quad (4)$$

gdje su: σ_1 i σ_3 - glavna naprezanja [22].

Teorija energije promjene oblika u obzir uzima sva naprezanja, stoga uvjet tečenja prema teoriji energije promjene oblika za troosno napregnuto stanje glasi:

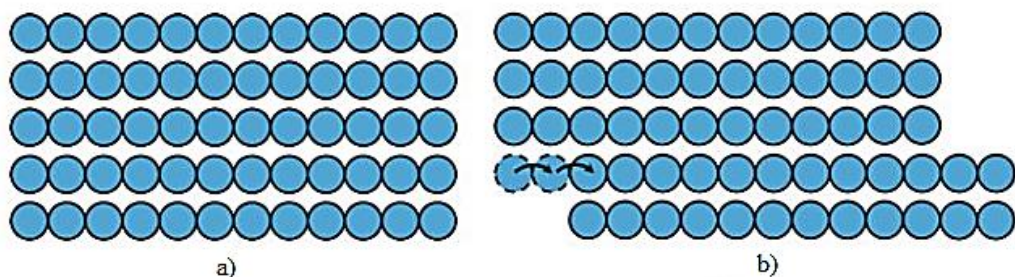
$$k_f = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (5)$$

Razlika između navedenih teorija iznosi 15 %. Može se zaključiti kako materijal počinje teći kada naprezanje dosegne granicu razvlačenja, da je o tipu stanja naprezanja ovisan i iznos brzine deformacije te kako, pomoću deformacija, nije moguće odrediti naprezanje [22].

2.2.2. Mehanizmi deformacije

Kod polikristala (većina metala i legura), eksperimentalnim analizama je dokazano kako plastična deformacija polikristala započinje u zrnima s najpovoljnijom orijentacijom, odnosno u ravninama u kojima djeluju najveća tangencijalna naprezanja dok se kod ostalih zrna odvija elastična deformacija. Stoga je, kako bi do plastične deformacije došlo po cijelom presjeku polikristala neophodno povećati silu. Plastična deformacija se prema teoriji oblikovanja deformiranjem odvija pomoću dva mehanizma, a to su translacijsko klizanje i stvaranje sraslaca (blizančenje, dvojnikovanje) [20,22].

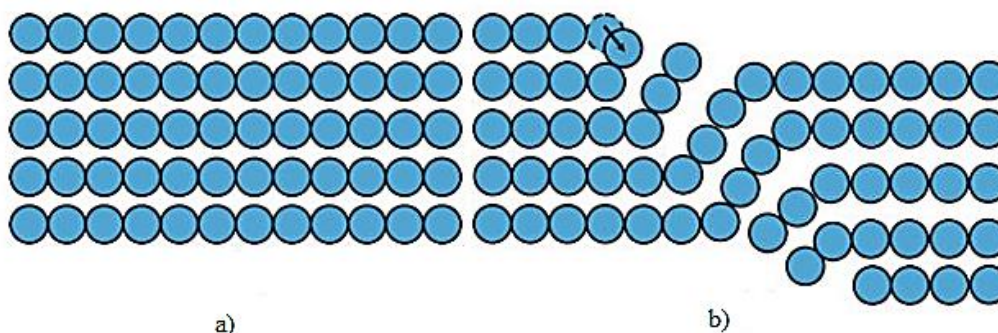
- a) **Translacijsko klizanje** – odvija se na način da jedan sloj atoma klizi po drugom sloju atoma pritom stvarajući klizne stepenice, a prestankom djelovanja sile ostaju u tom položaju. Ravnine klizanja većinom su one koje imaju najgušći raspored atoma te se atomi u ovim ravninama pomiču puno lakše od ostalih jer je međuatomska udaljenost manja. Ravnine klizanja se označavaju pomoću zagrada u kojima su tri broja proporcionalna recipročnim vrijednostima odsječaka koje čine promatrane ravnine na koordinatnim osima (x, y, z). Uz pojam ravnina klizanja bitan je i pojam pravac klizanja koji označava smjer klizanja te oni zajedno čine klizni sustav. Slikom 4 dan je shematski prikaz translacijskog klizanja [20]. Raspored atoma u kristalnoj rešetci, odnosno sama vrsta kristalne rešetke prilikom plastične deformacije je vrlo bitan faktor. Što su međuatomske veze slabije, to je materijal lakše plastično deformirati, tako da se mehanizam translacijskog klizanja odvija kod metala (i legura) s FCC kristalnom rešetkom kao što su Al, Cu, Ag itd [20, 23]



Slika 4. Shematski prikaz translacijskog klizanja, (a) početno stanje, (b) mehanizam translacijskog klizanja [24]

- b) **Dvojnikovanje (sraslanje)** – nastupa kada tangencijalna naprezanja postignu kritičnu vrijednost – dolazi do stvaranja sraslaca. Mehanizam premještanja atoma se odvija na način da se atomi jedne strane ravnine na kojoj se odvija sraslanje pomiču u položaj zrcalne slike atoma druge ravnine sraslanja za određeni kut. Slikom 5 prikazan je

shematski prikaz mehanizma dvojnikanja. Također, kod ovog mehanizma plastične deformacije bitnu ulogu imaju temperatura i brzina deformacije, tako će se sniženjem temperature i povećanjem brzine deformacije povećati i plastična deformacija dvojnikanjem. Kod dvojnikanja dolazi do promjene orijentacije ravnine [20,24].

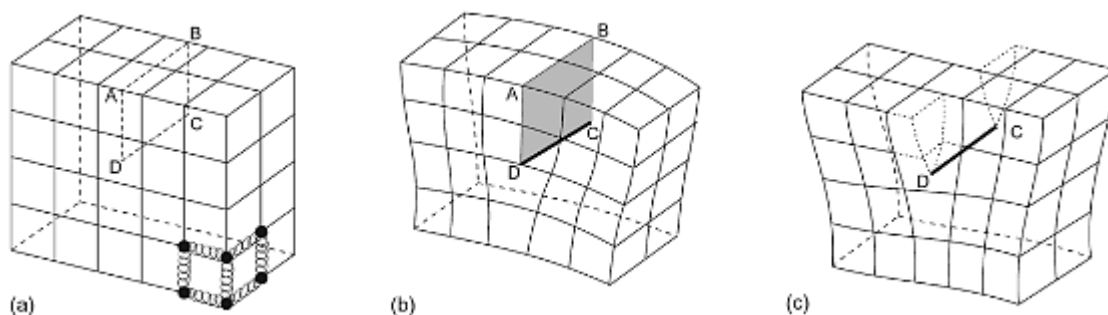


Slika 5. Shematski prikaz dvojnikanja, (a) početno stanje, (b) mehanizam dvojnikanja [24]

2.2.3. Dislokacije

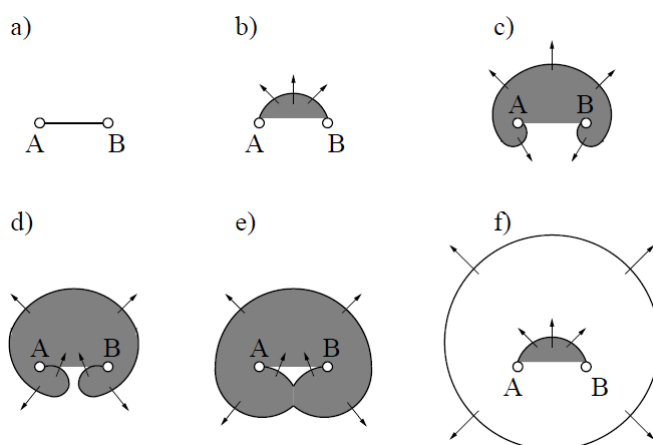
Hladnu deformaciju nije moguće objasniti bez poznavanja pojma dislokacija i njihovog razumijevanja, jer su upravo ove jednodimenzijske linijske greške nositelji plastične deformacije na mikroskopskoj razini. Prema definiciji, dislokacije su linijske nepravilnosti koje nastaju između deformiranog i nedeformiranog dijela kristalne rešetke. Pojam dislokacija uveden je 1905-e godine od strane Voltera i Timpe istražujući elastični kontinuum, ne uzevši u obzir mehanička svojstva. Tek 1934-e godine G.I. Taylor i E. Orowan te paralelno s njima M. Polanyi, prvi su put dislokacije objasnili kao mehanizam plastične deformacije, a hipoteza je potvrđena 1956-e godine uz pomoć elektronskog mikroskopa. Utjecaj dislokacija na mehanička svojstva prilikom plastične deformacije je od velikog značaja. Gibanjem kroz rešetku, dislokacije potiču plastičnu deformaciju, što znači da se manjom pokretljivošću dislokacija smanjuje i mogućnost plastične deformacije nekog materijala. Povećanjem gustoće dislokacija, u slučaju hladne deformacije dolazi do očvršćivanja materijala [20, 25].

Dislokacije mogu biti pozitivne i negativne. U slučaju kada je broj atoma koji se nalazi u redu veći od broja atoma idealne rešetke riječ je o pozitivnoj dislokaciji, a kada je broj atoma u redu manji od broja atoma idealne rešetke riječ je o negativnoj dislokaciji. Kroz kristalnu rešetku gibaju se diskontinuirano, korak po korak. Dije se na rubne (bridne) dislokacije i vijčane (zavojne) dislokacije. Mehanizam kretanja rubne dislokacije je paralelno na smjer klizanja te ona može klizati ravninom gdje se nalazi dislokacijska linija, dok je mehanizam kretanja vijčane dislokacije okomito na smjer klizanja i vlastitu duljinu te može klizati svim ravninama. Slikom 6 (a) prikazan je idealan kristal. Kada se pretpostavi da se sve veze između površine ABCD prekinu te da se površine razdvoje tako da se može umetnuti dodatna poluravnina atoma između njih, kao što je prikazano slikom 6 (b) rezultat je pozitivna rubna dislokacija. Zavojna dislokacija, prikazana slikom 6 (c) se često predstavlja kao helikoid kako bi vizualizacija bila lakša [26].



Slika 6. (a) Idealan kristal, (b) rubna dislokacija, (c) zavojna dislokacija [26]

Dislokacije nastaju prema mehanizmu kojeg su predložili, neovisno jedan o drugom F.C. Frank i W. T. Read, odnosno službeno nazvanim Frank-Readovim izvorom (slika 7). Prema ovom mehanizmu, već postojeća dislokacija djelovanjem smičnih naprezanja stvara još dislokacija.



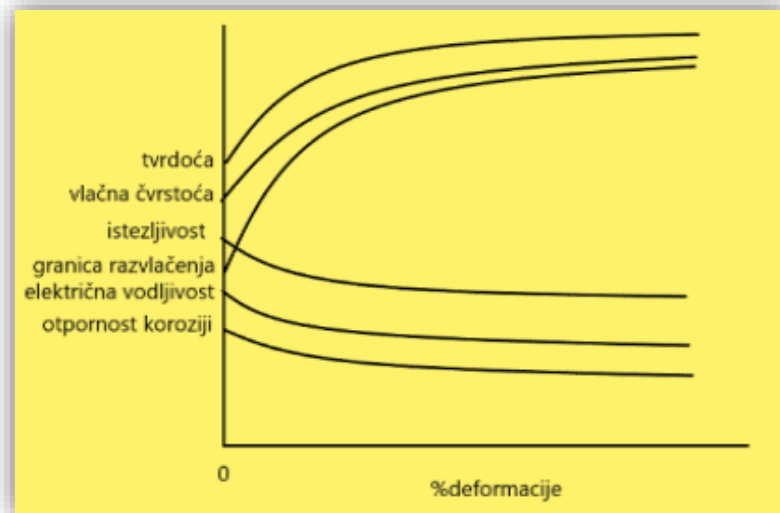
Slika 7. Frank-Readov izvor [27]

Pokretna dislokacija se zaustavi (slika 7 (a)) te se potom, pod utjecajem smičnih naprezanja savija paralelno smjeru djelovanja smičnog naprezanja (slike 7 (b), (c) i (d)). Kada se dislokacija zatvori na području „krakova“ proces kreće ispočetka, tj. dolazi do stvaranja dislokacijske petlje i nove dislokacije (slika 7 (e)) te kretanje procesa ispočetka (slika 7 (f)). Ovim mehanizmom moguće je stvaranje velikog broja dislokacija u jednoj ravlini klizanja [20,27], no povećanjem broja nastalih dislokacija, raste njihova gustoća, što dovodi do ojačanja materijala i potrebe za sve većim naprezanjem za nastavak plastične deformacije.

2.2.4. Očvršćivanje AlMg legure deformacijom u hladnom stanju

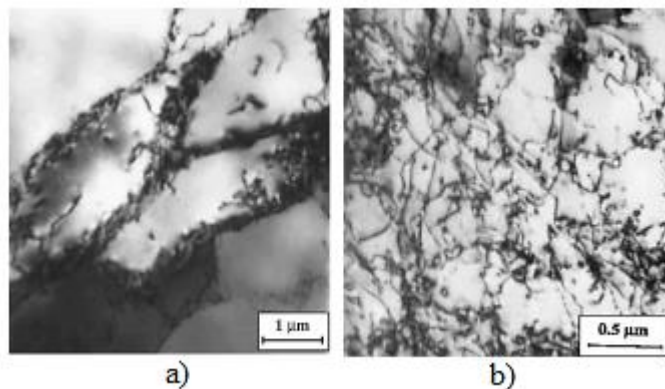
Deformacija u hladnom stanju provodi se ispod temperatura rekristalizacije. Nastale se dislokacije ne poništavaju i raste njihova gustoća. Veći dio mehaničke energije utrošene na hladnu plastičnu deformaciju akumulira se u materijalu kao unutarnja energija materijala. Dio te energije zaostaje u materijalu u obliku unutarnjih naprezanja, dok se dio disipira u okolinu kao toplinska energija. Količina unutarnjih naprezanja ovisna je o samom procesu deformacije, ali i o stupnju deformacije. S porastom stupnja deformacije dolazi do porasta unutarnjih naprezanja što

dovodi do porasta broja dislokacija i u konačnici do porasta čvrstoće odnosno deformacijskog očvršćivanja. Pritom dolazi i do porasta tvrdoće, ali pada nekih fizikalnih svojstava poput električne vodljivosti (slika 8). Naknadnim zagrijavanjem nakon hladne prerade, moguće je provesti statičku rekristalizaciju i statički oporavak kako bi se uklonila zaostala naprežanja [20,28].



Slika 8. Utjecaj hladne plastične deformacije na promjenu svojstava [28]

Očvršćivanje deformacijom u hladnom stanju je uz precipitacijsko očvršćivanje osnovni mehanizam za poboljšanje mehaničkih svojstava nekih Al legura. Tijekom hladne plastične deformacije dolazi do porasta broja dislokacija, odnosno dominiraju procesi stvaranja i umnožavanja dislokacija te njihovog nakupljanja na granicama zrna što dovodi do porasta čvrstoće. One se potom nagomilavaju na preprekama stvarajući dislokacijske petlje dok, istovremeno, dolazi do stvaranja novih dislokacija Frank-Readovim mehanizmom. Dislokacije su znatno gušće raspoređene kod AlMg legure (slika 9a) u odnosu na njihov raspored kod čistog aluminija (slika 9b) nakon hladne deformacije što je zapravo neposredan utjecaj magnezija kao legirajućeg elementa [29,30].

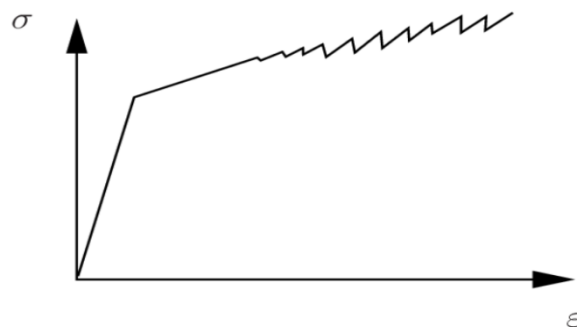


Slika 9. TEM prikaz gustoće dislokacija nakon istog stupnja deformacije kod (a) čistog aluminija, (b) aluminij-magnezij legure [29]

Prilikom istraživanja utjecaja dodatka legirajućih elemenata na mehanička svojstva koristi se statički vlačni pokus te se pri tome klasično snimaju dijagrami naprezanje-deformacija. Kod pojedinih AlMg legura ustanovljeno je kako pri statičkom vlačnom pokusu dobivamo dijagrame s određenim nazubljenima krivulje naprezanje-deformacija. Pojave na krivulji ukazuju na nestabilnosti plastičnog toka koje se u istraživanjima povezuju s pojavom poznatom pod nazivom Portevin-Le Chatelier efekt [31].

2.3. Portevin-Le Chatelier efekt

Godine 1837-e F. Savart dokumentirao je plastičnu nestabilnost bakrene trake dodavajući utege na njezine krajeve primijetivši iznenadna produljenja s malim povećanjem sile, dok je s većim povećanjem opterećenja do produljenja trake došlo tek u malom postotku. Potom je problem prenio svom studentu M.A. Massonu. Masson se ozbiljnije posvetio problemu te je godine 1841-e priopćio kako naprezanje ostaje konstantno s povećanjem opterećenja sve dok se uz malu promjenu opterećenja ne dođe do naglog izduženja trake i pada naprezanja. Također, Masson je pojavu proučavao na različitim legurama i pri različitim temperaturama te je izjavio kako „do izduženja krutih tijela ne dolazi kontinuirano već skokovito“ [32]. Međutim, značajniji doprinos prijašnjim istraživanjima dan je tek 1909-e kada je pojavu detaljnije proučavao Francois Le Chatelier na srednjeugljičnim čelicima. Nakon toga, 1923-e Francois Le Chatelier i Albert Portevin provodili su istraživanja na duraluminiju te su zaključili kako se ovaj fenomen javlja prije svega u legurama zbog prisustva otopljenih elemenata te da do nestabilnosti plastičnog toka dolazi u određenoj domeni temperature i brzine deformacije [33]. Danas je ova pojava poznata pod nazivom Portevin-Le Chatelier (PLC) efekt. PLC efekt se na dijagramu naprezanje-deformacija prilikom statičkog vlačnog ispitivanja manifestira kao nazubljena krivulja (slika 10) gdje svaki pik predstavlja nagli pad naprezanja koji istraživači povezuju s negativnom osjetljivošću na brzinu deformacije [34].



Slika 10. Ilustrativni prikaz nazubljene krivulje [34]

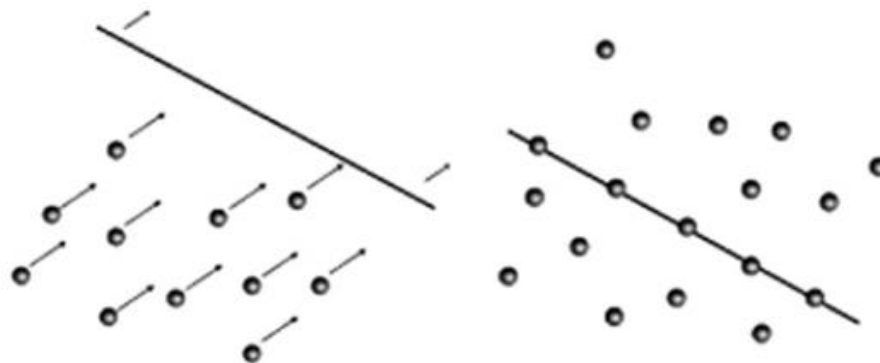
PLC efekt se kod aluminijskih legura javlja pri sobnim temperaturama stoga se na Al-legurama i najčešće proučava, no s razvojem tehnologije, pojava PLC efekta primijećena je i kod nekih čelika u temperaturnom rasponu do 200 °C te pri temperaturi od 500 °C kod legura na bazi nikla [35]. Na mogućnost pojave PLC efekta utječu određeni faktori kao što su kristalna orijentacija, gustoća dislokacija, disperzija čestica u materijalu i dr. U prvom redu, ovakva lokalizirana deformacija ostavlja negativan utjecaj na svojstva legure, što je naravno nepoželjno, materijal postaje manje duktilan čime se povećava opasnost od krhkog loma. Također, moguće su greške i na samoj površini u vidu hrapavosti koju nije moguće ukloniti, odnosno predstavlja nepopravljiv

nedostatak u području primjene gdje se zahtijevaju visokokvalitetne površine [34]. Međutim, mogući su i pozitivni doprinosi kao što su više vrijednosti vlačne čvrstoće.

Razvojem tehnologije dan je bolji uvid u problematiku PLC efekta i njegov nastanak. Najčešće se eksperimentalna istraživanja provode vlačnim ispitivanjima uz kombinaciju različitih metoda kao što su termografska analiza, metoda korelacije digitalne slike, metoda akustičnih emisija itd. [34].

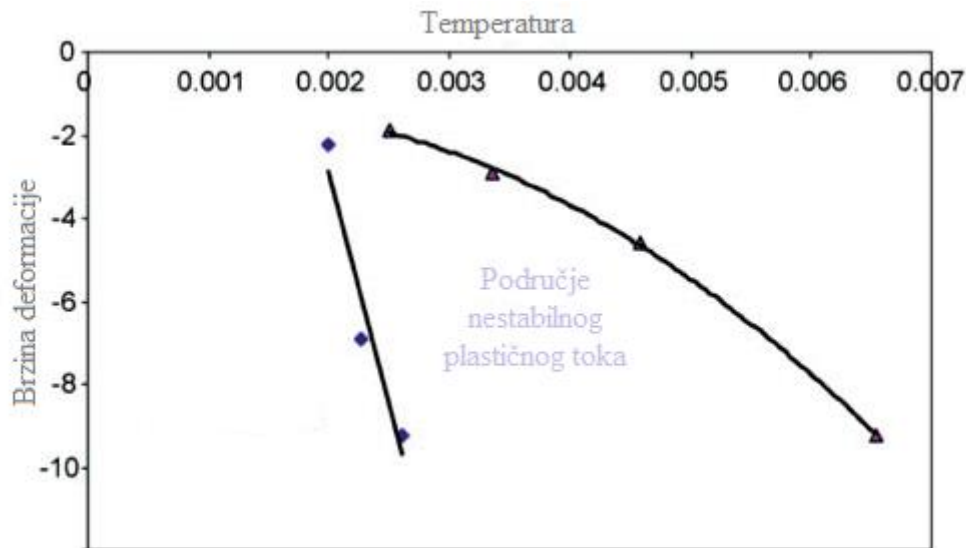
2.3.1. Mehanizam nastanka Portevin-Le Chatelier efekta

Postoji više mehanizama koji su predloženi kako bi se opisao nastanak PLC efekta, no najvjerojatniji i najčešće upotrebljavan je model dinamičkog deformacijskog starenja (*eng.* Dynamic Strain Aging). Ovaj model se definira kao interakcija pokretnih dislokacija s atomima otopljenog elementa koji predstavljaju prepreke gibanju dislokacija. Dislokacije su, kao što je spomenuto, nositelji plastične deformacije te će se plastična deformacija, a ujedno i plastično tečenje u stabilnim uvjetima odvijati neometano. Kod DSA modela u jednom trenutku dislokacije će svojim kretanjem naići na tzv. oblake otopljenih elemenata. Oblaci otopljenih elemenata predstavljaju nakupine precipitata otopljenih elemenata preko kojih, ako su mekani dislokacije prelaze neometano, dok u suprotnom, dolazi do usporavanja i zapinjanja dislokacija čime će se na određeno vrijeme blokirati njihovo kretanje kao što je prikazano slikom 11. Povećanjem vanjske sile (naprezanja) dislokacije uspijevaju savladati prepreku te nastavljaju svoje kretanje. Ovakav slučaj na dijagramu naprezanje-deformacija očituje se kao nazubljena krivulja [36].



Slika 11. Interakcija dislokacija s otopljenim elementima [36]

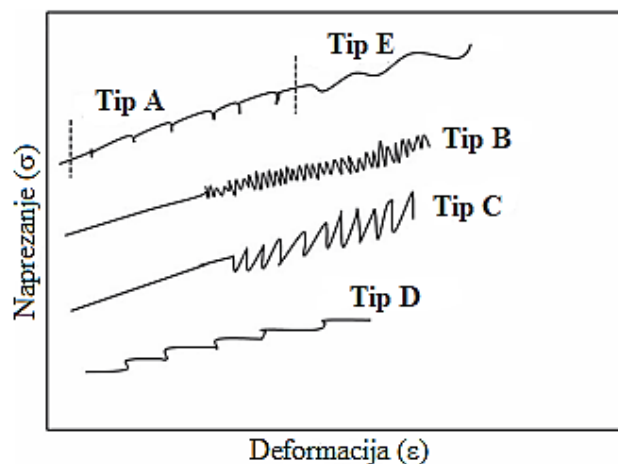
Važno je naglasiti činjenicu da ne mora nužno doći do nestabilnosti plastičnog tečenja u svakom koraku dinamičkog deformacijskog starenja jer je spektar djelovanja opširan. Stoga je široko prihvaćeno stajalište kako će do nestabilnosti plastičnog tečenja (nazubljeni tok materijala), ujedno i PLC efekta doći u određenom rasponu temperature i brzine deformacije, točnije kada ukupna osjetljivost na brzinu deformacije postane negativna (*eng.* negative Strain Rate Sensitivity) [37]. Zbog negativne osjetljivosti na brzinu deformacije, s povećanjem brzine, naprezanje potrebno za deformaciju se smanjuje što dovodi do lokalizirane deformacije. Slikom 12 prikazan je raspon temperature i brzine deformacije pri kojima dolazi do nestabilnog plastičnog tečenja korištenjem eksperimentalnih rezultata i Arrheniusove jednadžbe. Ispitivanja su u ovom slučaju provedena na AlMg leguri [36].



Slika 12. Raspon temperature i brzine deformacije pri kojima dolazi do pojave nestabilnog plastičnog toka kod AlMg legure [36]

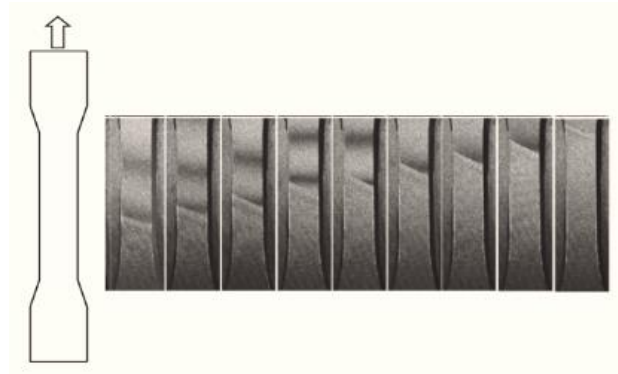
2.3.2. Deformacije PLC efekta

Najistaknutija značajka PLC efekta je lokalizirana deformacija u određenom dijelu zone deformacije te njezino gibanje duž zone s povećanjem naprezanja. Lokalizirana deformacija očitava se kao linija, debljine do nekoliko milimetara pod kutom od približno 55° u odnosu na smjer razvlačenja uzoraka, te se kroz uzorak može gibati na različite načine. Na temelju tipa nazubljenosti na dijagramu naprezanje-deformacija, tipovi linija PLC efekta mogu se okarakterizirati u nekoliko skupina prema načinu propagacije linija. Prema tome, dijele se na linije tipa A, linije tipa B i linije tipa C koje se mogu pojaviti zasebno ili kombinirano. U nekim literaturama također se navode i linije tipa D te linije tipa E kao što je prikazano slikom 13. Međutim, njihova pojava detektirana je u samo određenim legurama i pri određenim uvjetima. Također, dokazano je kako prilikom promjene u temperaturi i brzini deformacije može doći do prijelaza iz jednog tipa linije u drugu, ali istovremeno ne mogu nastati dva različita tipa linija [34, 38].



Slika 13. Klasifikacija PLC linija [39]

Prema nekim istraživanjima [40] u početnoj fazi plastične deformacije prilikom statičkog vlačnog ispitivanja PLC linije se dinamično gibaju kroz uzorak. Kako deformacija napreduje, linije imaju tendenciju ka usporavanju da bi na kraju postale stacionarne. Na mjestu gdje se PLC linija prestala kretati u konačnici dolazi do loma uzorka što dovodi do zaključka da se mjesto loma preklapa sa stacionarnim PLC pojasom. Slikom 14 prikazan je tipičan primjer gibanja PLC linija kroz uzorak aluminijske legure pri vlačnom opterećenju i brzini razvlačenja od 2,5 $\mu\text{m/s}$.

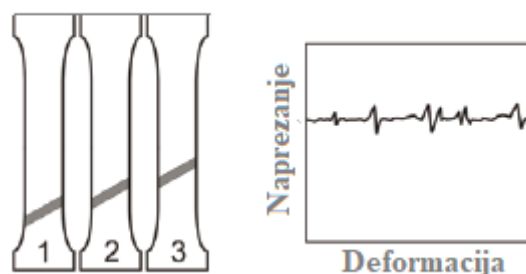


Slika 14. Gibanje PLC linija kroz aluminijsku leguru [40]

Linije tipa A

Linije tipa A (slika 15) se pojavljuju kod većih brzina deformacije i nižih temperatura te su propagirajuće prirode. Kroz uzorak se šire kontinuirano, slično longitudinalnom valu. Na dijagramu naprezanje-deformacija, linije tipa A karakterizira najnepravilniji oblik s vrlo gustim nazubljenjima i lokaliziranim malim padom naprezanja. Također, dijele se na dvije potkategorije; A1 linije koje nastaju prilikom većeg pada naprezanja i A2 koje se pojavljuju kada naprezanje pada postepeno [3,38,41]. U nekim slučajevima je zamijećeno kako kada linija dođe do kraja uzorka, moguće je njezino „odbijanje“ pri kojemu dolazi do promjene nagiba [34].

Tip A



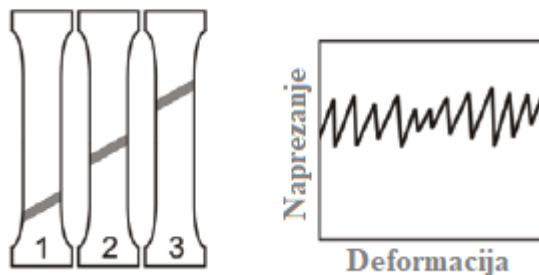
Slika 15. Shematski prikaz gibanja linija tipa A i karakterističan izgled nazubljenja

Linije tipa B

Linije tipa B (slika 16) se pojavljuju pri srednjim brzinama deformacije i srednjim vrijednostima temperature. Mogu se formirati na bilo kojem mjestu uzorka te se kroz uzorak šire isprekidano s

približno jednakim razmacima, a nazubljenja na dijagramu naprezanje-deformacija izgledaju pravilnije u odnosu na linije tipa A [38,41]. Neka istraživanja su pokazala nukleaciju više linija tipa B na uzorku (do 4 linije) istovremeno.

Tip B

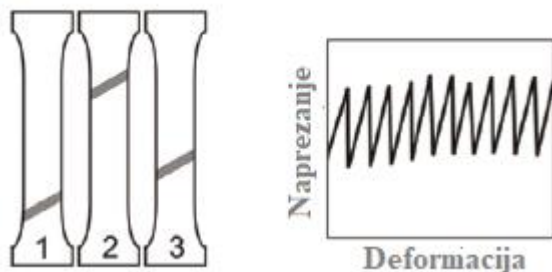


Slika 16. Shematski prikaz gibanja linija tipa B i karakterističan izgled nazubljenja

Linije tipa C

Linije tipa C (slika 17) se pojavljuju kod nižih brzina deformacije i viših temperatura. Stohastičke su prirode što znači da nasumično nastaju po cijeloj duljini uzorka. Na dijagramu naprezanje-deformacija, nazubljenja na krivulji su najdosljednija oko određene amplitude i frekvencije za razliku od prethodna dva tipa [37,41].

Tip C



Slika 17. Shematski prikaz gibanja linija tipa C i karakterističan izgled nazubljenja

Linije tipa D i E

Linije tipa D pojavljuju se prilikom velikih napreznja, na dijagramu naprezanje-deformacija ih karakterizira krivulja u obliku stepenica, njihova pojava zabilježena je u AlMgSc leguri s nanoprecipitatima. Linije tipa E analogne su linijama tipa A, a zabilježene su kod velikih brzina deformacije, neposredno prije dostizanja maksimalne sile. Konkretno, dodatni tipovi linija D i E uvedeni su kako bi se razlikovali specifični obrasci kod nekih komercijalnih legura [3,37].

Kombinirane linije

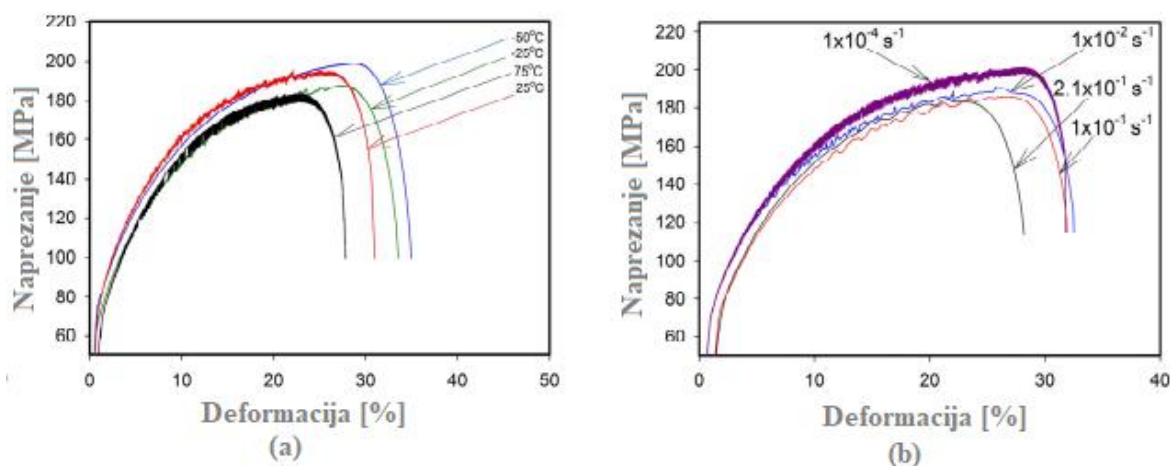
Kombinirane, odnosno prijelazne linije koje se mogu pojaviti su A+B gdje se linije tipa A i linije tipa B javljaju uzastopno tijekom statičkog vlačnog ispitivanja, slično je i s kombiniranim linijama B+C. Njihova pojava povezana je s deformacijskim očvršćivanjem ili s određenom nestabilnošću prilikom provođenja eksperimenta. Kombinacija sva tri tipa linija, A+B+C još uvijek nije primijećena [38].

2.3.3. Portevin-Le Chatelier efekt kod AlMg legura

Pojava PLC efekta kod AlMg legura čest je predmet istraživanja znanstvenika. Pojava PLC efekta ne ovisi samo o kemijskom sastavu legure već i kao što je spomenuto, vrlo važnu ulogu imaju temperatura i brzina deformacije. Pritom se definiraju dvije vrijednosti, kritična temperatura (T_k) i kritična brzina deformacije ($\dot{\epsilon}_k$) odnosno vrijednosti prilikom kojih dolazi do pojave PLC nestabilnosti. Pritom, pojavi PLC efekta kod komercijalnih AlMg legura prethodi homogena deformacija nakon koje kod određenog kritičnog stupanja deformacije dolazi do pojave PLC efekta [42].

2.3.3.1. Utjecaj temperature i brzine deformacije na PLC efekt kod AlMg legura

Istraživanja [2] provedena na Al3Mg leguri pri različitim temperaturama u rasponu od -100 do 150 °C i konstantnoj brzini deformacije od $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ te na sobnoj temperaturi i različitim brzinama deformacije od 1×10^{-5} do 1×10^{-1} pokazala su kako se prilikom promjena temperature PLC efekt javlja u temperaturnom rasponu od -50 do 25 °C, a ispod i iznad navedenih temperatura plastična deformacija odvijala se stabilno, odnosno bez PLC nazubljenja na deformacijskoj krivulji (slika 18 (a)). Kod različitih brzina deformacije i sobnoj temperaturi, pojava PLC efekta primijećena je kod svih brzina deformacije kao što je prikazano slikom 18 (b).



Slika 18. PLC nazubljenja kod različitih temperatura (a) i kod različitih brzina deformacije (b) [2]

2.3.3.2. Utjecaj magnezija na PLC efekt kod AlMg legura

Legiranjem tehnički čistog aluminijskog s iznad 2 % magnezija pridonosi značajnom povećanju amplitude nazubljenja te dovodi do dovoljne mikrostrukturne nestabilnosti koja u konačnici dovodi do pojave PLC linija prilikom statičkog vlačnog ispitivanja. Kod hladne deformacije, dislokacije se gibaju te nailaze na granice zrna ili precipitate čime se u određenim slučajevima blokira njihovo kretanje što dovodi do nestabilnosti plastičnog toka. Ovakvo ponašanje primijećeno je i kod intersticijskih i kod supstitucijskih krutih otopina premda AlMg legura spada u supstitucijske čvrste otopine [29,43].

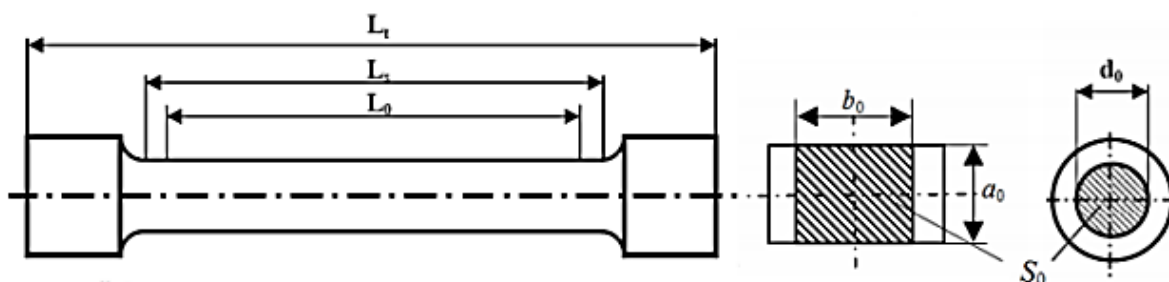
2.3.3.3. Utjecaj veličine zrna na PLC efekt kod AlMg legura

Istraživanja [44] na Al₄,5Mg_{0,5}Mn leguri su pokazala kako veličina zrna također ostavlja utjecaj na pojavu PLC efekta. Korištene su legure navedenog kemijskog sastava proizvedene na dva različita načina. Jedna metalurgijom praha (fino sitno zrno) i druga koja je proizvedena klasičnim postupkom (krupnozrnata struktura) čiji je uzorak uzet iz ingota. Kod legure proizvedene metalurgijom praha prilikom ispitivanja PLC efekta, nestabilan plastični tok (nazubljeni tok) zabilježen je gotovo odmah nakon početka eksperimenta, dok je kod komercijalne legure u početnom stadiju uočena mala homogena deformacija nakon koje je slijedila nestabilnost. Frekvencija nazubljenja znatno je manja kod finozrnate legure u odnosu na komercijalnu leguru. Prilikom hladne plastične deformacije dolazi do rafinacije zrna te su u ovom slučaju rezultati raznoliki. Veličina zrna u nekim slučajevima dovodi do nestabilnosti plastičnog toka, a u nekima ne ili su zabilježene vrijednosti kada je osjetljivost na brzinu deformacije približno jednaka nuli što predstavlja granicu između stabilnog i nestabilnog plastičnog toka. Prema tome, navodi se kako veličina zrna veća od 1 μm dovodi do pojave nestabilnosti plastičnog toka [38].

2.4. Metode istraživanja Portevin-Le Chatelier efekta

2.4.1. Statičko vlačno ispitivanje

Statičkim vlačnim ispitivanjem utvrđuju se osnovna mehanička svojstva materijala. Provodi se na statičkoj vlačnoj kraljici koja može biti hidraulička ili mehanička, pod utjecajem jednoosnog vlačnog naprežanja. Ispitni uzorci korišteni kod statičnog vlačnog ispitivanja nazivaju se epruvetama čiji su oblik i dimenzije standardizirani te ovisno o materijalu mogu biti okruglog ili četvrtastog oblika. Epruveta (slika 19) je tijekom ispitivanja konstantno statički opterećena dok ne dođe do njezinog kidanja tj. loma [21].



Slika 19. Epruveta s označenim karakterističnim vrijednostima [45]

Gdje je: L_0 – početna duljina mjernog područja

L_s – duljina ispitnog područja, [mm]

L_r – ukupna duljina epruvete, [mm]

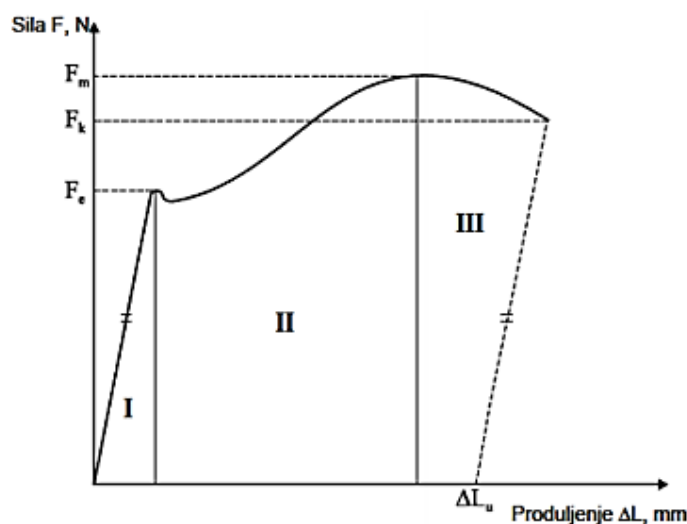
a_0 – širina četvrtastog uzroka, [mm]

b_0 – debljina četvrtastog uzorka, [mm]

d_0 – promjer kružnog uzorka, [mm]

S_0 – početna površina poprečnog presjeka uzorka, [mm²].

Tijekom ispitivanja, prate se vrijednosti sile i produljenja epruvete čime se dobije dijagram sila-produljenje prikazan slikom 20 koji se sastoji od tri područja.



Slika 20. Dijagram sila-produljenje [45]

U prvom području se prikazuje linearna ovisnost sile i produljenja (Hook-eov pravac) što čini elastično područje sve dok se ne dostigne sila razvlačenja (F_e) nakon koje linearna ovisnost nestaje (drugo područje dijagrama) gdje je potreban porast sile kako bi se produljenje nastavilo. Prirast sile se odvija sve dok se ne postigne vrijednost maksimalne sile (F_m) gdje dolazi do pojave vrata na epruveti i ujedno smanjenja površine poprečnog presjeka. Nakon navedenog slijedi treće područje dijagrama gdje se postiže konačna vrijednost sile (F_k) pri kojoj dolazi do loma epruvete [21].

Potom se računa konačno produljenje epruvete pomoću izraza:

$$\Delta L_u = L_u - L_0, [\text{mm}]. \quad (6)$$

Uzevši u obzir da vrijednosti sile ne daju uvid u ponašanje materijala, potrebno je uvrstiti početnu površinu poprečnog presjeka uzorka kako bi se dobile vrijednosti naprezanja. Naprezanje se računa prema izrazu:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, [\text{MPa}] \quad (7)$$

gdje je: F – sila, [N].

Nakon tog se računa istežanje ili relativno produljenje prema sljedećim izrazima:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}, [\text{mm/mm}], \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} * 100, [\%] \quad (9)$$

U području elastičnog istežanja vrijedi Hookeov zakon koji je dan izrazom:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (10)$$

gdje je: E – Youngov modul elastičnosti.

Youngov modul elastičnosti ovisi o jačini veze atoma i/ili molekula u kristalnoj rešetci i on određuje nagib Hookeovog pravca. U području elastičnih deformacija, u slučaju prestanka djelovanja sile materijal će se vratiti u svoje prvobitno stanje, odnosno neće doći do trajne deformacije. Najvišu točku Hookeovog pravca čini granica razvlačenja koja se izražava kao:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, [\text{MPa}] \quad (11)$$

Kod materijala gdje je prijelaz iz elastičnog u plastično područje kontinuiran, dogovorena je konvencionalna granica razvlačenja (R_p) odnosno naprežanje koje nakon prestanka djelovanja sile u materijalu ostavlja određenu plastičnu deformaciju koja najčešće iznosi 0,2 % [45].

Vlačna čvrstoća (R_m) uz granicu razvlačenja predstavlja osnovno mehaničko svojstvo materijala. Definiše se kao omjer maksimalne sile koja je postignuta kod statičkog vlačnog ispitivanja i početne ploštine presjeka epruvete. Vlačna čvrstoća iskazuje se izrazom:

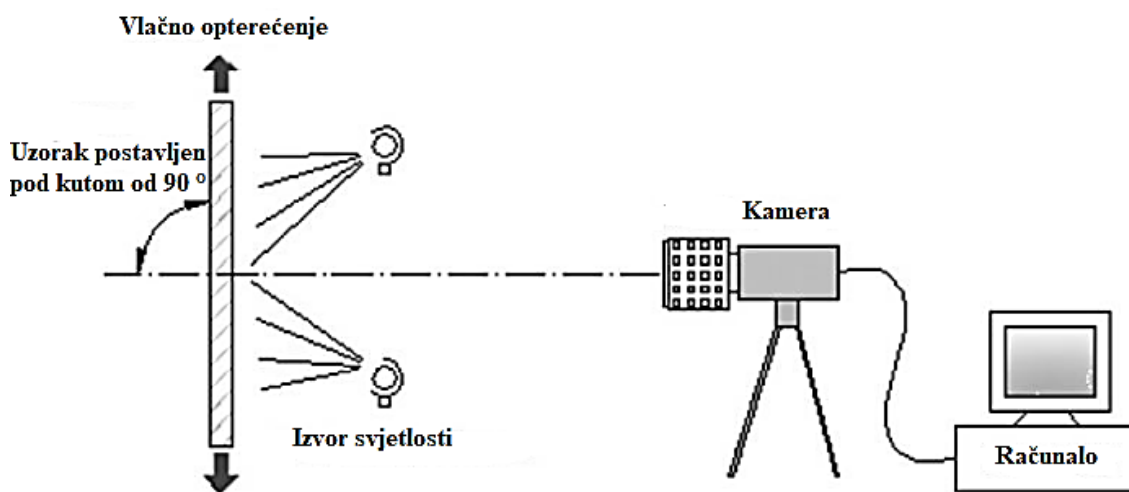
$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, [\text{MPa}] \quad (12)$$

Gdje je: F_m – maksimalna sila, [N], [46].

2.4.2. Digitalna korelacija slike

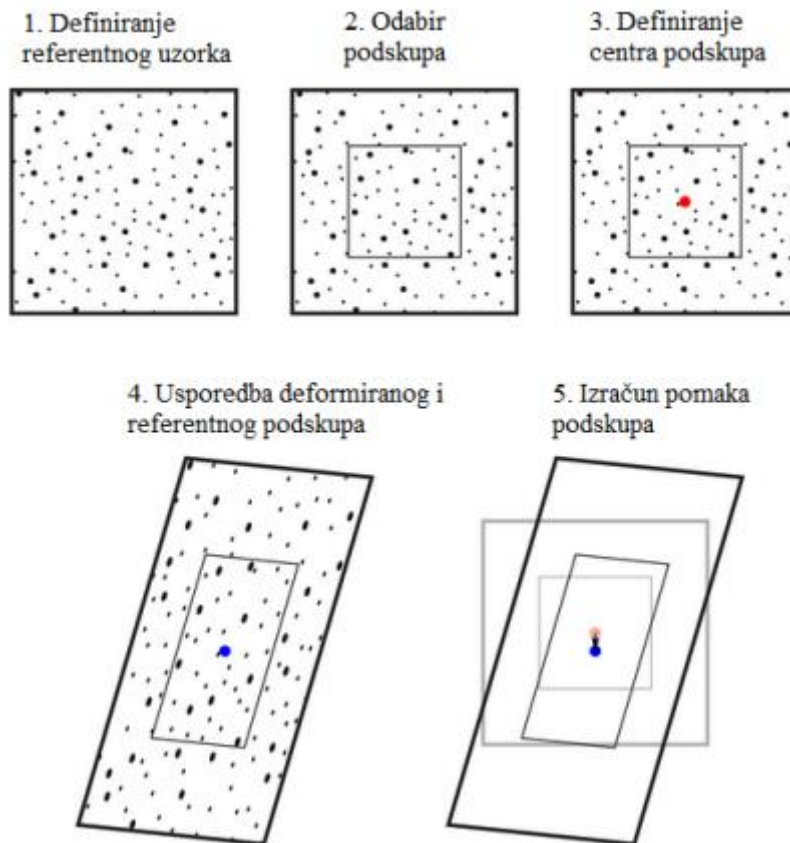
Digitalna korelacija slike (*eng.* Digital Image Correlation - DIC) je vrlo jednostavna, beskontaktna optička metoda koja se koristi za mjerenje pomaka i raspodjelu deformacija u mjernom području. Bazira se na usporedbi digitalnih slika površine uzorka snimljenih prije deformacija i nakon deformacije. DIC može biti 2D, gdje se za ispitivanje koristi jedna kamera ili 3D gdje se za ispitivanje koriste dvije ili više kamera. Digitalna korelacija slike koristi se za mjerenje pomaka, a iz pomaka preko poznatih parametara moguće je odrediti i deformacije kod vlačnih, tlačnih i torzijskih opterećenja. Materijali na kojima se može provoditi mjerenje DIC metodom su raznovrsni stoga se može primijeniti na keramici, metalima, polimerima, tkivu (npr.

koštano tkivo) itd. Kod korištenja metode digitalne korelacije slike potrebni su sljedeći elementi: uzorak (epruveta), izvor svjetlosti, kamera i računalo s odgovarajućim programom za analizu podataka kao što je prikazano slikom 21 [47].



Slika 21. Shematski prikaz ispitivanja metodom digitalne korelacije slike (2D) [47]

Provedba metode digitalne korelacije slike zahtjeva tri koraka: pripremu i postavljanje uzorka, snimanje slika te obradu podataka pomoću algoritma korelacije putem računalnog programa. Kod 2D slučaja, snima se uzorak u ravni s kamerom. Priprema uzorka jedan je od najvažnijih koraka kod metode digitalne korelacije slike, a odnosi se na nanošenje crnog ili bijelog mat premaza na uzorak kako bi se izbjegla moguća refleksija svjetlosti na koji se potom određenom tehnikom nasumično nanose markeri (točkice), crne ili bijele boje ovisno o boji prethodno nanesenog mat premaza zbog postizanja kontrasta. Kod eksperimenata koji se provode na sobnoj temperaturi koriste se boje na bazi vode, najčešće u spreju [48]. Kod osvjetljenja uzorka potrebno je paziti na ravnomjernu osvjetljenost područja interesa uzorka. Uzorak se među čeljusti kidalice postavlja pod kutom od 90° te mora stajati ravno, a kamera se postavlja okomito na ispitivanu površinu. Potom se snima nedeformirano stanje uzorka što predstavlja referentnu sliku te se odabire područje interesa nakon čega se određuju podskupovi (*eng.* facet size). Centar podskupa predstavlja područje pomoću kojeg će se određivati pomaci nedeformiranog i deformiranog stanja. Nakon što se uzorak deformira, podskup na deformiranoj slici podudara se s podskupom na referentnoj slici. Nakon toga pomoću korelacijskog algoritma slijedi računanje relativnog pomaka podskupa između referentne i deformirane slike kao što je prikazano slikom 22 [48,49]. Slika 22 prikazuje pojednostavljeni slučaj s jednim podskupom zbog lakšeg vizualiziranja dok je u realnosti broj podskupova puno veći.

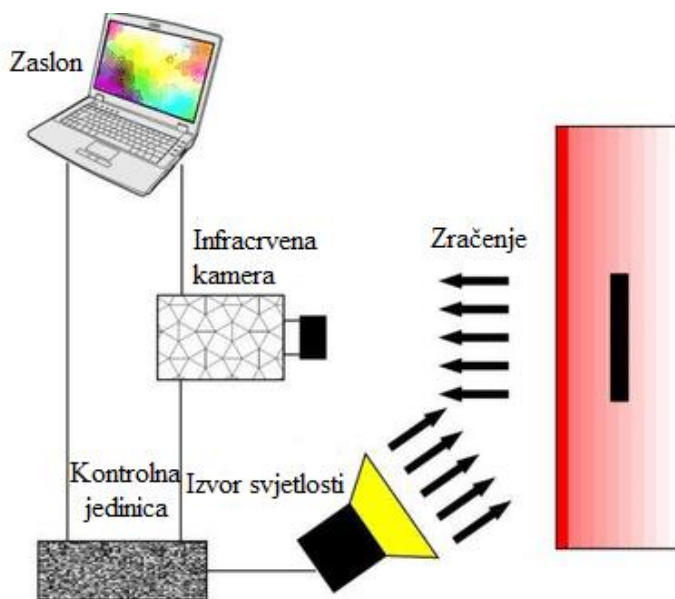


Slika 22. Prikaz metode digitalne korelacije slike [49]

U današnje vrijeme dostupan je niz programskih paketa za provođenje metode digitalne korelacije slike. Kod eksperimentalnog dijela ovog diplomskog rada korišten je programski paket GOM Correlate za 2D mjerenja.

2.4.3. Infracrvena termografija

Sredinom 19-og stoljeća, Lord Kelvin opisao je međupovezanost promjene unutarnje energije sustava uslijed provedenog rada plastične deformacije, najjednostavnije rečeno da primjenom sile na neko tijelo dolazi do promjene u temperaturi tog tijela. Prilikom statičkog vlačnog ispitivanja, na epruvetu se djeluje određenom silom (vlačnim opterećenjem) koje ako se zadovolje uvjeti plastičnog tečenja, dovodi do plastične deformacije i u konačnici loma. Stoga se termografsko snimanje pokazalo kao dobar pokazatelj ponašanja materijala prilikom plastične deformacije, pogotovo ako je riječ o nehomogenoj deformaciji kao u slučaju PLC efekta [50]. Slikom 23 dan je shematski prikaz mjerenja metodom infracrvene termografije.



Slika 23. Shematski prikaz mjerenja metodom infracrvene termografije [51]

Infracrvena termografija je beskontaktna metoda mjerenja temperature i njezine raspodjele po nekom tijelu. Poznato je da svako tijelo iznad temperature apsolutne nule emitira zračenje, ali različitog intenziteta. Pomoću infracrvene termografije toplinska energija nekog tijela u infracrvenom spektru elektromagnetskog zračenja transformira se u vidljivu sliku odnosno termogram primjenom Stefan-Boltzmannove jednadžbe za realna tijela koja glasi:

$$W_{uk} = A * \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (13)$$

gdje je: W_{uk} – ukupna toplinska energija koju zrači jedinična površina realnog tijela [W/m^2],

A – površina tijela,

ε – faktor emisivnosti,

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta [$5,67 * 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$],

T – apsolutna temperatura tijela [K] [52,53].

Infracrvena termografija dijeli se na aktivnu i pasivnu. Aktivna termografija koristi se u kvantitativne svrhe većinom u laboratorijskim uvjetima kada se tijelo koje se snima dovodi u stanje pobude kako bi se postigla temperaturna razlika okoline i nekog tijela. Pasivna termografija koristi se u kvalitativne svrhe te se koristi u vrlo širokom spektru, od industrijskih postrojenja pa do građevinarstva. Glavna prednost pasivne termografije je to što ne zahtjeva dovođenje nekog tijela u stanje pobude kako bi se mogla provesti snimanja [53].

Infracrvena kamera sastoji se od optičke leće, osjetnika infracrvenog zračenja, pretvarača električnog signala, elektronskog pojačala i kartice za pohranu snimaka te dodatno pripadajućeg računala i softvera kako bi se prikupljene informacije mogle vizualizirati u obliku termograma koji se dalje proučava kvalitativno ili kvantitativno.

Energija se može emitirati, transmitirati i reflektirati. Kod ispitivanja plastične deformacije metodom termografije mjeri se emitirana energija uzorka. Metalni materijali, pogotovo čelici, aluminij i aluminijske legure imaju visoku reflektivnost elektromagnetskog zračenja u infracrvenom spektru što dovodi do krivih rezultata mjerenja metodom termografije jer je infracrvena kamera podešena da površine shvaća kao crna tijela, stoga se uzorci premazuju crnim mat premazom s visokim faktorom emisivnosti što se pokazalo vrlo učinkovitim. Također, prilikom korištenja infracrvene kamere potrebno je paziti i na vanjske utjecajne faktore (npr. utjecaj sunčeve energije) da bi rezultati bilo što mjerodavniji [50].

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ovog diplomskog rada ispitivao se utjecaj različitih brzina razvlačenja na PLC efekt kod AlMg_{4,5} legure. Ispitivanja su provedena statičkim vlačnim pokusom uz istovremeno korištenje digitalne kamere za 2D DIC metodu i termovizijske kamere. Prilikom provođenja eksperimenta najprije su primjenjivane konstantne brzine razvlačenja redom 10 mm/min, 20 mm/min i 50 mm/min te je potom ispitivanje provedeno pri konstantnom porastu napreznja redom 5 MPa/s i 10 MPa/s.

Uvjeti ispitivanja prikazani su tablicom 4.

Tablica 4. Uvjeti ispitivanja

Tempratura [°C]	Relativna vlažnost zraka [%]	Brzine razvlačenja [mm/min]	Porast napreznja [MPa/s]
26	35	10	5
		20	
		50	10

3.1. Priprema uzoraka

Uzorci korišteni za ispitivanje izrađeni su od AlMg_{4,5} legure, strojnom obradom na CNC stroju. Dimenzije mjernog područja uzoraka iznose 55 x 20 x 3 mm. Također, svakom uzorku dodijeljena je prikladna oznaka kako bi raspoznavanje bilo lakše. Slikom 24 prikazan je uzorak (eproveta) AlMg_{4,5} legure u standardnom obliku za statičko vlačno ispitivanje.



Slika 24. Standardna epruveta aluminijske legure (AlMg_{4,5}) za statičko vlačno ispitivanje

Površina uzorka za standardno ispitivanje statičkim vlačnim pokusom nije adekvatna za DIC i termografsku analizu jer je izrazito sjajna i samim time dolazi do refleksije. Kako bi rezultati bili precizni i točni slijedilo je nanošenje crnog mat premaza na mjerno područje uzoraka (suženo područje epruvete) kako bi se postigao određen faktor emisivnosti, odnosno uklonila refleksija površine što se zahtjeva prilikom upotrebe DIC i termografske analize. Također, prilikom nanošenja premaza potrebno je paziti da sloj ne bude prevelike debljine. U ovom slučaju faktor emisivnosti premaza iznosio je 0,95. Slikom 25 prikazan je uzorak s crnim mat premazom.



Slika 25. Epruveta s nanesenim crnim mat premazom

Kada se na uzorak nanese crni mat premaz slijedi nanošenje bijelih točkica (markera) pomoću kojih se kod DIC metode u korelacijskom programu određuju pomak i deformacija. Bijeli markeri nanose se nasumično. U ovom slučaju markeri su se nanosili korištenjem aerosol spreja što je idealno za nasumično nanošenje. Prilikom nanošenja bilo je potrebno paziti na metodu nanošenja markera. Nanošenje se ne provodi direktno na uzorak jer bi pokrivenost površine uzorka u tom slučaju bila prevelika, stoga se markeri nanose s gornje strane na određenoj udaljenosti od uzorka (približno 50 cm). Nakon nanošenja markera, bilo je potrebno pričekati određeno vrijeme prije početka ispitivanja da se osuše. Slikom 26 prikazan je uzorak s bijelim markerima.



Slika 26. Epruveta s nanesenim bijelim točkicama (markerima)

3.2. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje provedeno je na kidalici proizvođača Hegewald & Peschke inspekt 100 (slika 27) koja je prilagođena za različita laboratorijska istraživanja. Maksimalno opterećenje ove kidalice iznosi 100 kN, a za finija ispitivanja koristi se opterećenje od 10 kN. Ispitivanja su provedena pri konstantnim brzinama razvlačenja od 10 mm/min, 20 mm/min i 50 mm/min te pri konstantnom porastu naprezanja od 5 MPa/s i 10 MPa/s kako bi se proučio utjecaj na PLC efekt. Uzorci su se u čeljusti kidalice postavljali precizno i ravno. Softver korišten za analizu podataka je LabMaster Tensile test.

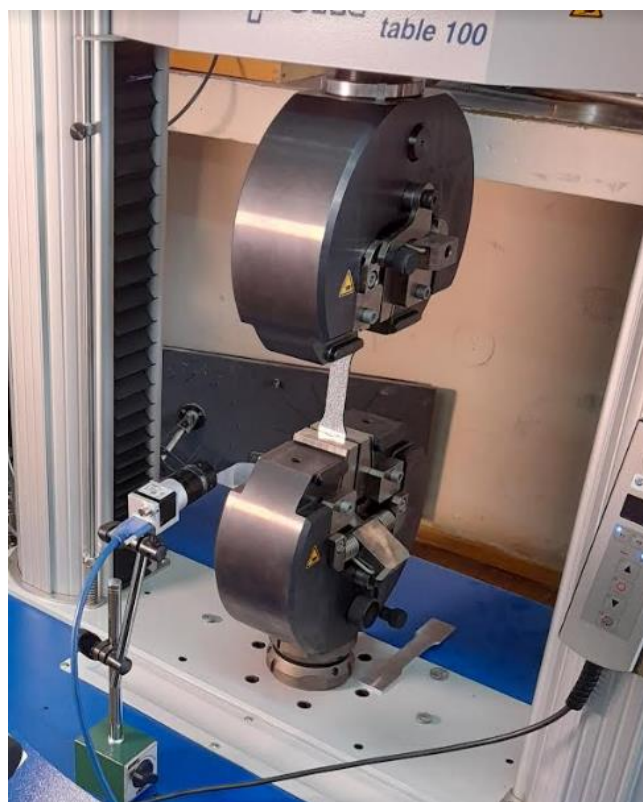


Slika 27. Kidalica Hegewald & Peschke inspekt 100

3.3. Analiza metodom digitalne korelacije slike

Metoda digitalne korelacije slike koristi se za mjerenje pomaka. Na osnovu izmjerenih pomaka kalkuliра se iznos deformacije. DIC analiza se provodi na način da se pomoću digitalne kamere snimaju slike prije, tijekom i nakon deformacije pomoću kojih se poslije u korelacijskom programu analiziraju pomaci, u ovom slučaju analizirali su se pomaci bijelih markera u odnosu na nedeformirano i deformirano stanje te su se dobili iznosi deformacija.

Prilikom pripreme za provođenje DIC analize bilo je potrebno osigurati nekoliko vrlo bitnih parametara, a to su dobro osvjetljenje, precizno postavljanje uzoraka u čeljusti kidalice te odabir optimalnog položaja digitalne kamere u odnosu na uzorak. Za osvjetljenje uzoraka korišten je reflektor, no njegova pozicija bila je na većoj udaljenosti kako bi se spriječila opasnost od refleksije i zagrijavanja. Nakon toga je slijedilo postavljanje digitalne kamere. Digitalna kamera (slika 28) postavljena je na udaljenost od 21 cm u odnosu na uzorak s fokusom na uzorak, a uzorak je u čeljusti kidalice bio postavljen ravno pod kutom od 90 °. Ovo su potrebni koraci i preduvjeti koje je potrebno zadovoljiti kako bi provođenje DIC analize bilo kvalitetno i točno.



Slika 28. Položaj digitalne kamere tijekom ispitivanja

Softverski paket koji je korišten za analizu dobivenih podataka je GOM CORRELATE2020. U program se prvo unosi referentna slika, potom ostale slike, a zatim su se unosili parametri.

3.4. Analiza metodom termografije

Infracrvenom kamerom snimane su temperaturne promjene uzorka tijekom deformacije sve do loma uzorka. Metoda termografije korištena je istovremeno s metodom digitalne korelacije slike i statičkim vlačnim ispitivanjem.

Korištena je termalna kamera Jenoptik VarioCAM® M82910 s nehladenim microbolometrom, robusnim kućištem, frekvencije 50 slika/video po sekundi, mjernog područja od -40 °C do 2000 °C. U nižem temperaturnom području ova kamera ima osjetljivost i do 80 mK. Širina spektra iznosi 8-13 μm , a rezolucija 320 x 240 piksela. Prije korištenja ove kamere potrebno je odrediti faktor emisivnosti ispitivanog tijela odnosno uzorka, a u specijalnim namjenama uzorci se premazuju crnim mat premazom. Slikom 29 prikazana je termalna kamera Jenoptik VarioCAM® M82910.



Slika 29. Termalna kamera Jenoptik VarioCAM® M82910

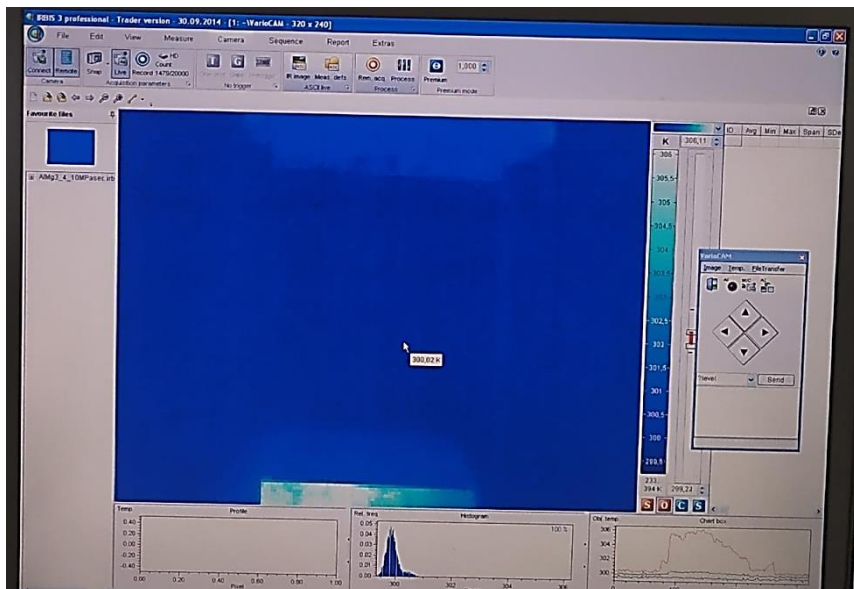
Termalna kamera bila je postavljena na tronožac na udaljenost 0,5 m u odnosu na uzorak te je korištena tijekom cijelog eksperimenta kao što je prikazano slikom 30.



Slika 30. Položaj termalne kamere tijekom ispitivanja

Prilikom termografske bilo je potrebno utvrditi uvjete okoline. Temperatura je prilikom provođenja eksperimenta iznosila 26 °C, a relativna vlažnost zraka iznosila je 35 %.

Program korišten za analizu bio je IRBIS3 Professional, te je za analizu snimljen velik broj termograma. Sučelje programa prikazano je slikom 31.



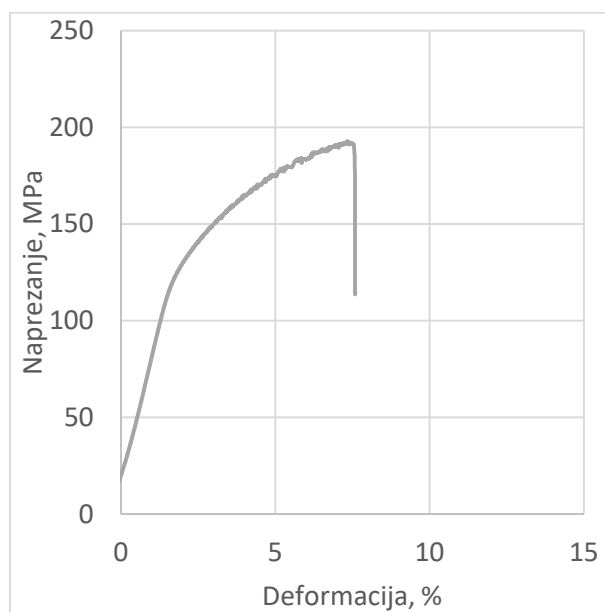
Slika 31. Sučelje programa IRBIS3 Professional

Nakon snimanja i analize, dobiveni su dijagrami koji su dani u rezultatima s pripadajućim objašnjenjima. Naknadno je analiza vršena usporedbom različitih rezultata istraživanja te su dani i zaključci.

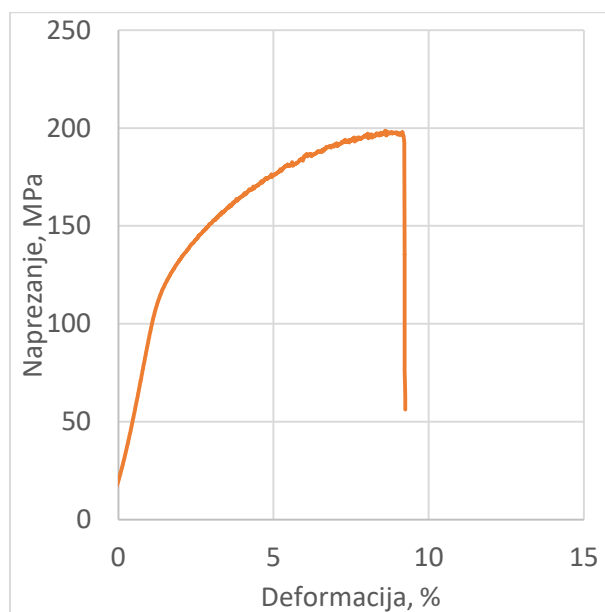
4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Rezultati statičkog vlačnog pokusa

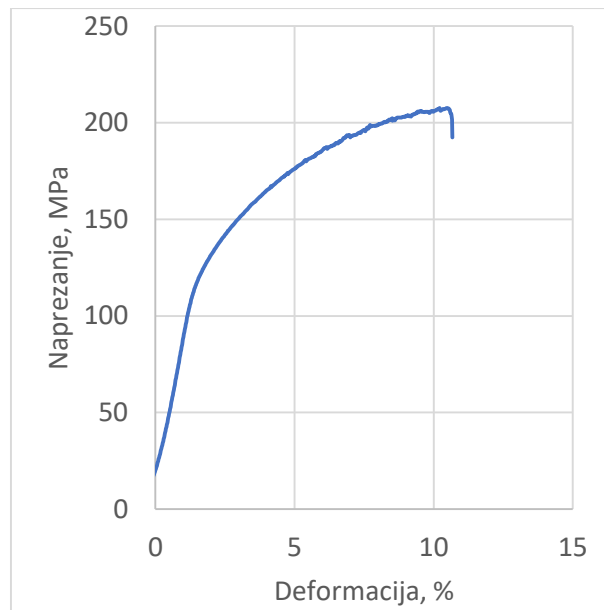
Kako se u eksperimentalnom dijelu navodi, proveden je statički vlačni pokus pri različitim uvjetima ispitivanja. Tijekom razvlačenja uzoraka kontinuirano su mjereni naprezanje, istežanje, snimana je deformacija površine DIC metodom i promjena temperature uslijed deformacije metodom termografije. Slikama 32, 33 i 34 prikazani su dijagrami naprezanje deformacije pri konstantnim brzinama razvlačenja 10, 20 i 50 mm/min.



Slika 32. Dijagram naprezanje-deformacija pri konstantnoj brzini razvlačenja 10 mm/min

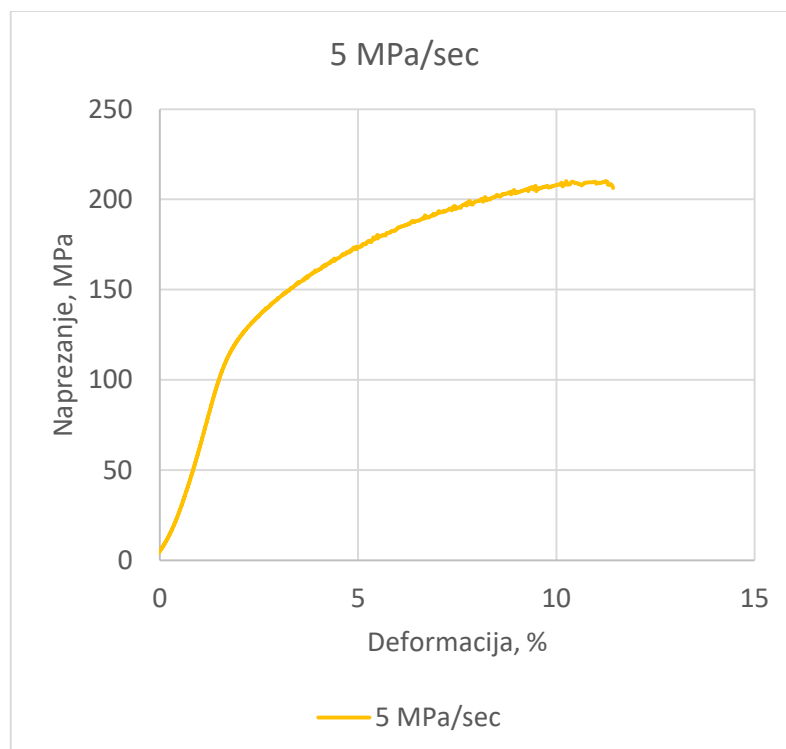


Slika 33. Dijagram naprezanje-deformacija pri konstantnoj brzini razvlačenja 20 mm/min

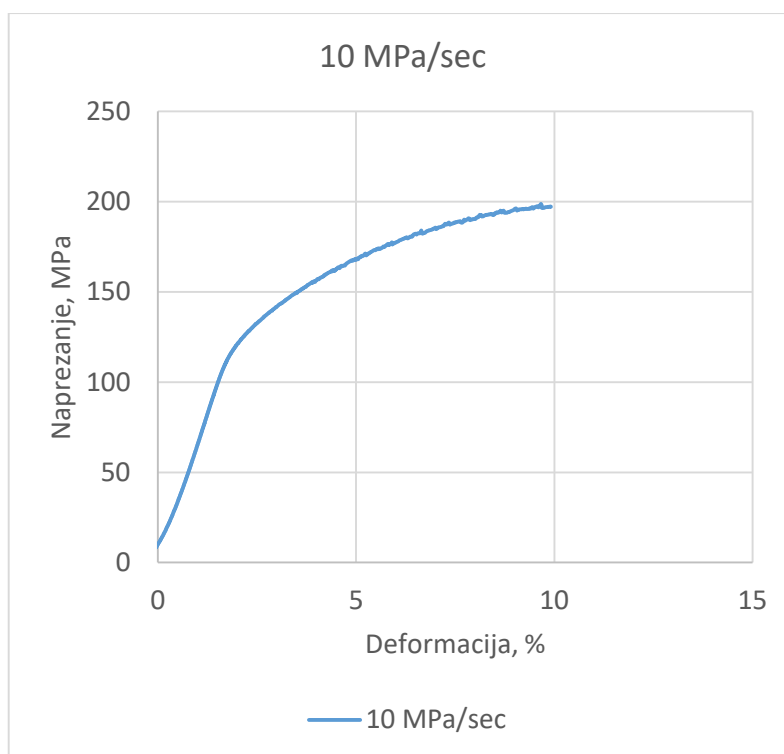


Slika 34. Dijagram naprezanje-deformacija pri konstantnoj brzini razvlačenja 50 mm/min

Iz dobivenih dijagrama naprezanje – deformacija vidljivo je kako tijekom plastične deformacije, pa sve do loma, postoji određena nestabilnost u porastu naprezanja. To se ranije povezalo s pojavom PLC efekta. U svrhu istraživanja utjecaja promjene parametara na samu PLC pojavu, dodatna ispitivanja su provedena na način da je tijekom eksperimenta korišten konstantni porast naprezanja i to 5 MPa/s i 10 MPa/s, slike 35 i 36.



Slika 35. Dijagram naprezanje-deformacija s konstantnim porastom naprezanja 5 MPa/s



Slika 36. Dijagram naprezanje-deformacija s konstantnim porastom naprezanja 10 MPa/s

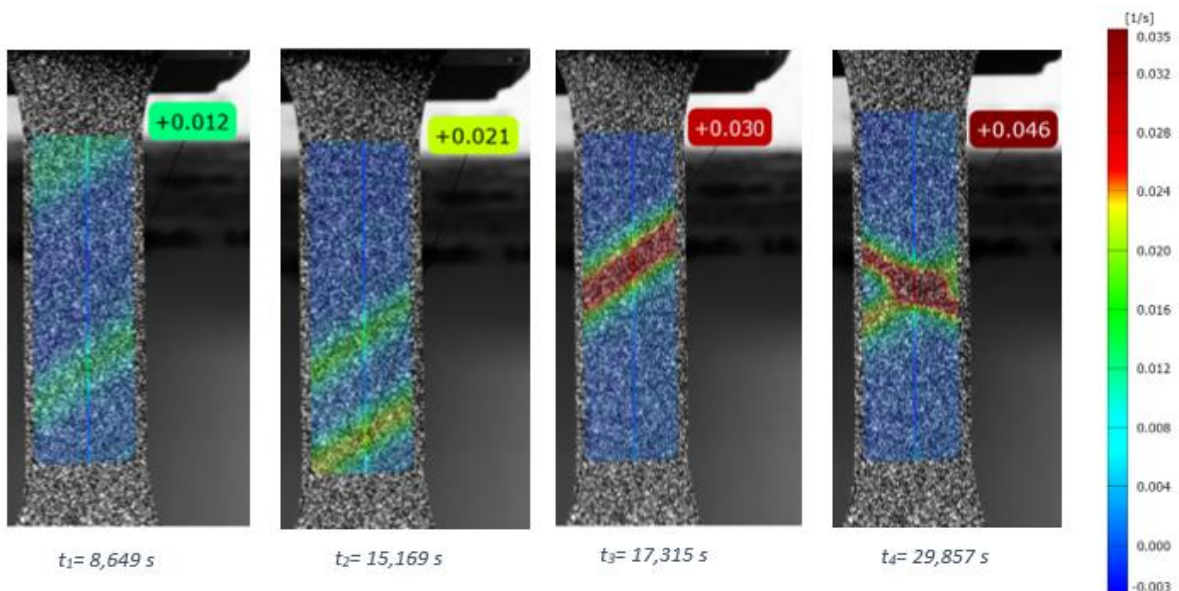
Neovisno od promjene parametara ispitivanja tijekom eksperimenta, jasno se vidi pojava osciliranja naprezanja tijekom eksperimenta, što ukazuje na formiranje i propagaciju PLC linija. Sama promjena brzine razvlačenja i korištenje konstantnog prirasta naprezanja ne utječu na izgled krivulje. Nestabilnosti u krivulji naprezanja se javljaju odmah nakon početka plastičnog toka metala. Sama nestabilnost je ujednačena tijekom cijelog procesa deformacije i traje sve do loma uzoraka. Ono što se jasno uočava iz prikazanih dijagrama naprezanje-deformacija je da na dijagramima nema karakteristične točke vlačne čvrstoće. Pri ispitivanjima klasičnih legura, krivulja toka pokazuje karakterističnu točku koja predstavlja vlačnu čvrstoću materijala. Nakon toga dolazi do formiranja vrata i pada očitog naprezanja na krivulji očvršćivanja. No kod promatrane legure to nije karakteristično, već porast naprezanja traje sve do loma uzorka.

Za pretpostaviti je da upravo te nestabilnosti dovode do konstantnog ojačanja sve do dostizanja vlačne čvrstoće, kada dolazi do loma ispitnih uzoraka. Može se uočiti kako porastom brzine razvlačenja i primjenom konstantnog prirasta naprezanja dolazi do većeg iznosa maksimalnog naprezanja te do povećanja iznosa deformacije pri kojoj dolazi do loma. U nastavku su dani rezultati DIC i termografske analize.

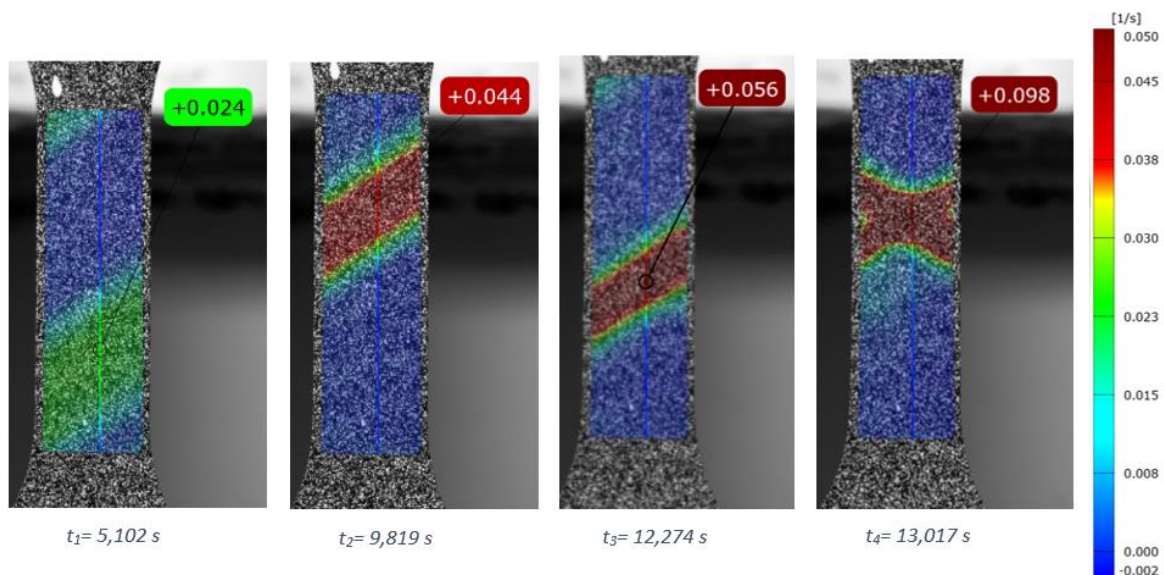
4.2. Rezultati DIC i termografske analize tijekom ispitivanja uzoraka

DIC i termografska analiza provedene su na svim ispitivanim uzorcima, prvo kako bi potvrdili prisutnost PLC pojave, a kasnije kako bi odredili utjecaj promjene brzine razvlačenja i primjene konstantnog prirasta naprezanja na samu pojavu.

Slikama 37 i 38 dana su dva primjera DIC prikaza pojave i propagacije PLC linija za dvije brzine razvlačenja.

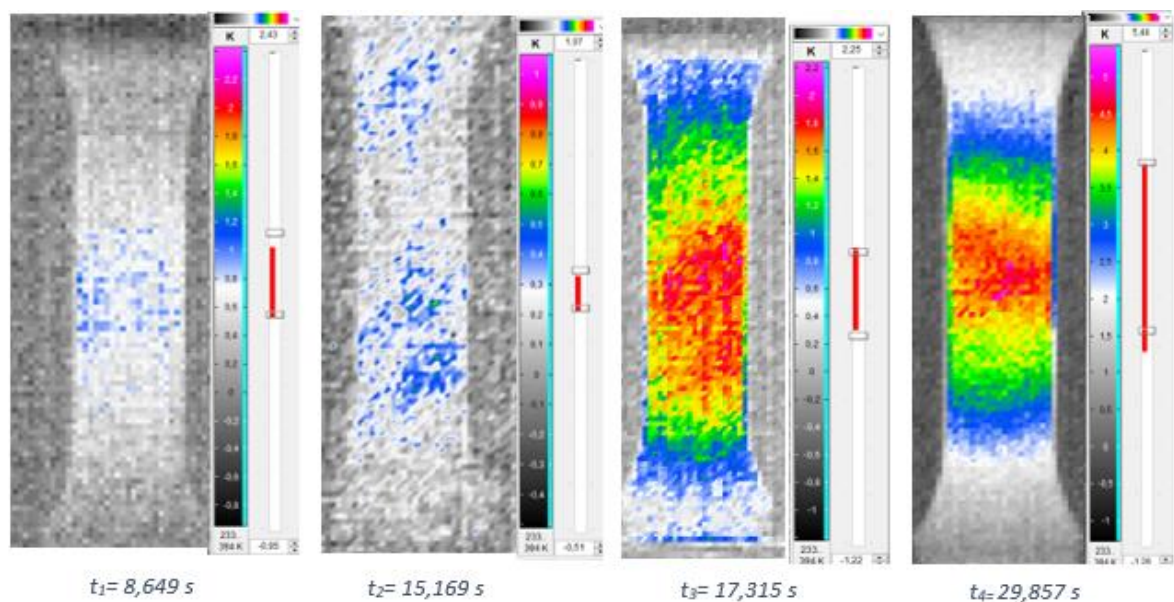


Slika 37. Prikaz DIC analize pri razvlačenju brzinom 20 mm/min

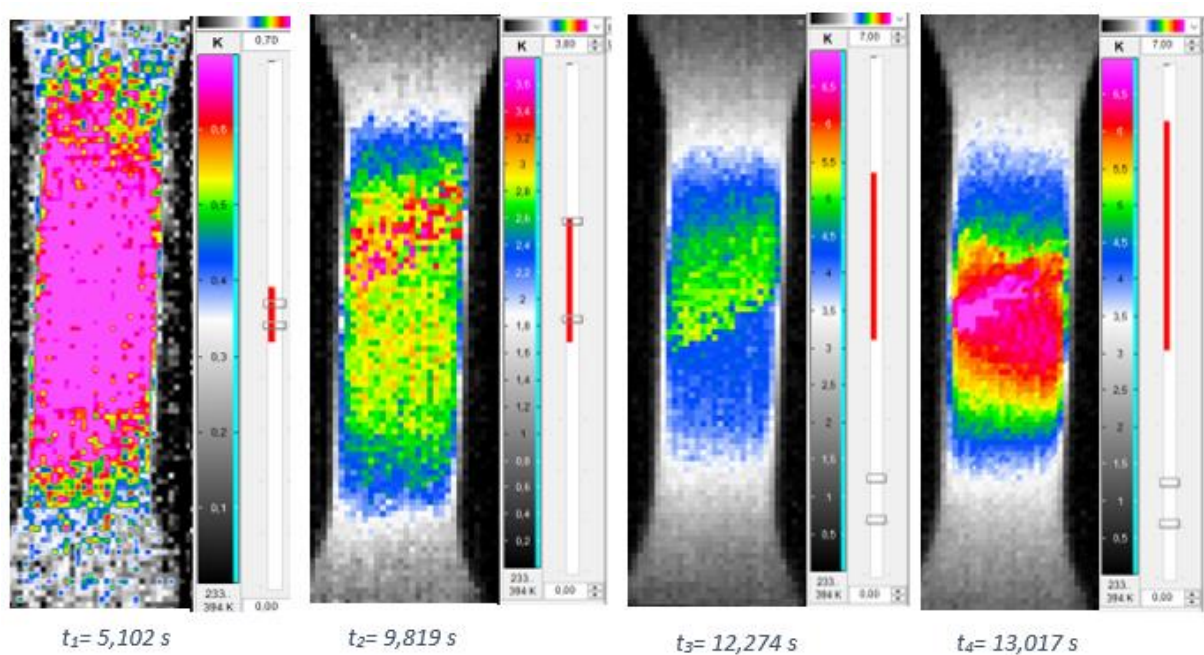


Slika 38. Prikaz DIC analize pri razvlačenju brzinom 50 mm/min

Slike su uzimane u određenim periodima s naznačenim vremenom trenutka kada su snimljene. Sama propagacija i formiranje jasno se uočavaju kod svih uzoraka. Također su u istim vremenima uzimane i termografske snimke kako bi naknadno mogli provesti usporedbu izmjerenih vrijednosti, slika 39 i slika 40.



Slika 39. Prikaz termografske analize pri razvlačenju brzinom 20 mm/min

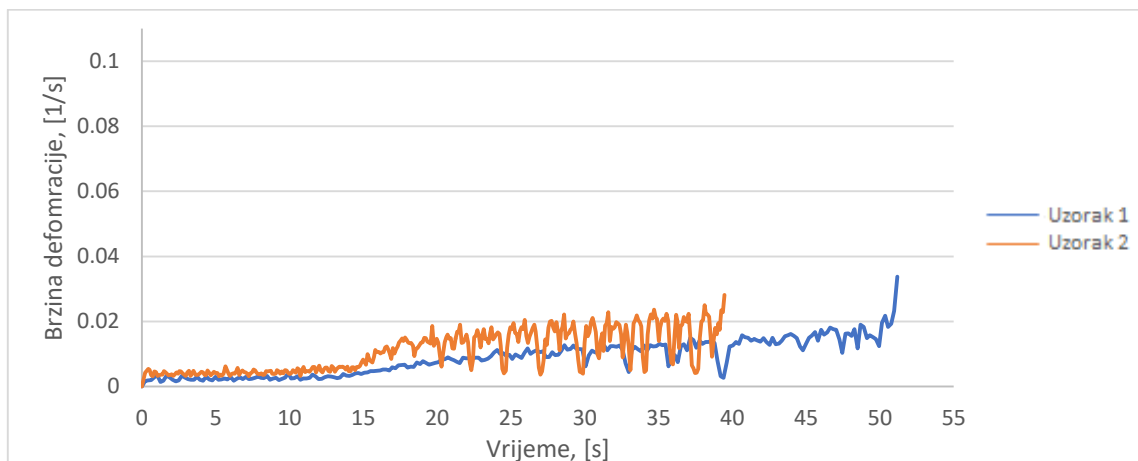


Slika 40. Prikaz termografske analize pri razvlačenju brzinom 50 mm/min

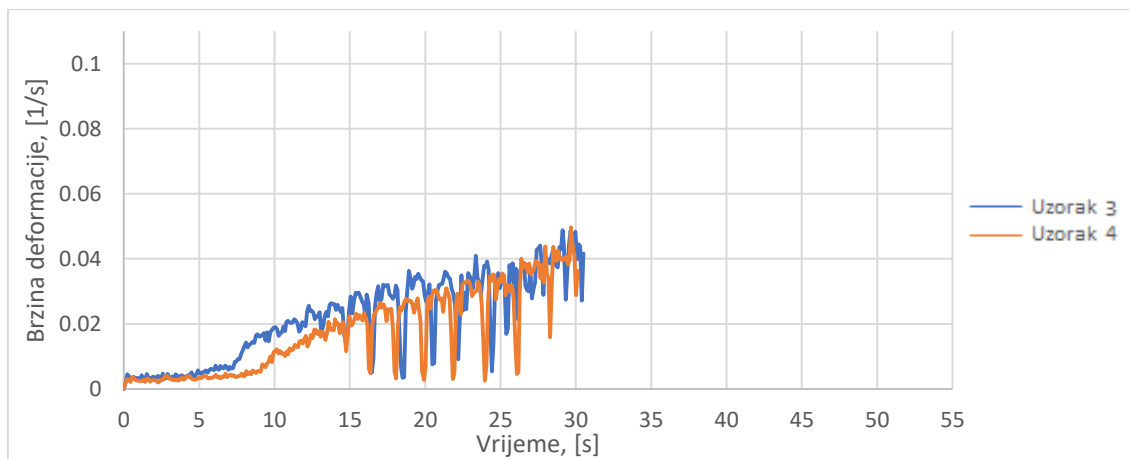
Sama pojava jasnije je uočljiva korištenjem DIC metode, pri čemu je potrebno odabrati prikaz promjene brzine deformacije u odnosu na prethodnu sliku u analizi. Time se dobije oštrije prikaz položaja i širine linije. Iz snimljenih deformacijskih mapa i termografske analize uočava se da neovisno od parametara ispitivanja postoji pojava PLC efekta kod ispitivane legure. DIC i termografija potvrđuju da se linije formiraju kroz cijeli period plastične deformacije sve do loma uzorka. Također se uočava kako povećanjem stupnja deformacije, dolazi do bržeg formiranja linija te do formiranja višestrukih linija istovremeno, slika 37 i slika 38.

Termografska kvalitativna analiza prikazuje kako povećanjem brzine razvlačenja dobijemo oštrij prikaz linija. To se povezuje s iznosom deformacije i napreznjima koji pri tome vladaju na samim linijama, pošto je iz prethodnih istraživanja plastične deformacije ovom metodom [54] dokazano kako temperaturna promjena koja se mjeri termografski direktno ovisi o ta dva parametra.

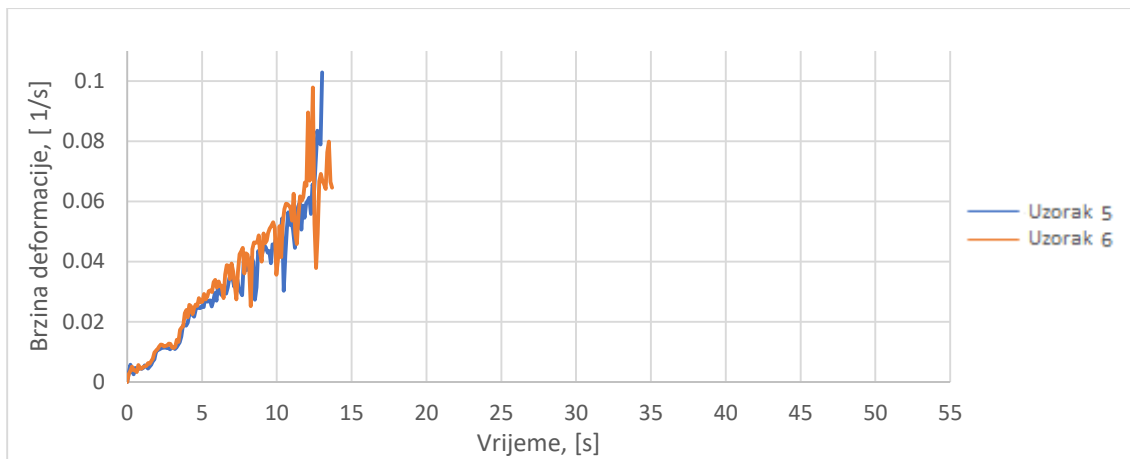
U nastavku su prikazani rezultati kvantitativne DIC analize i termografije za nekoliko uzoraka. Slikama 41-43 prikazane su promjene brzine deformacije, izmjerene DIC metodom, pri različitim brzinama razvlačenja, redom 10 mm/min, 20 mm/min, 50 mm/min.



Slika 41. Brzina deformacije pri brzini razvlačenja 10 mm/min

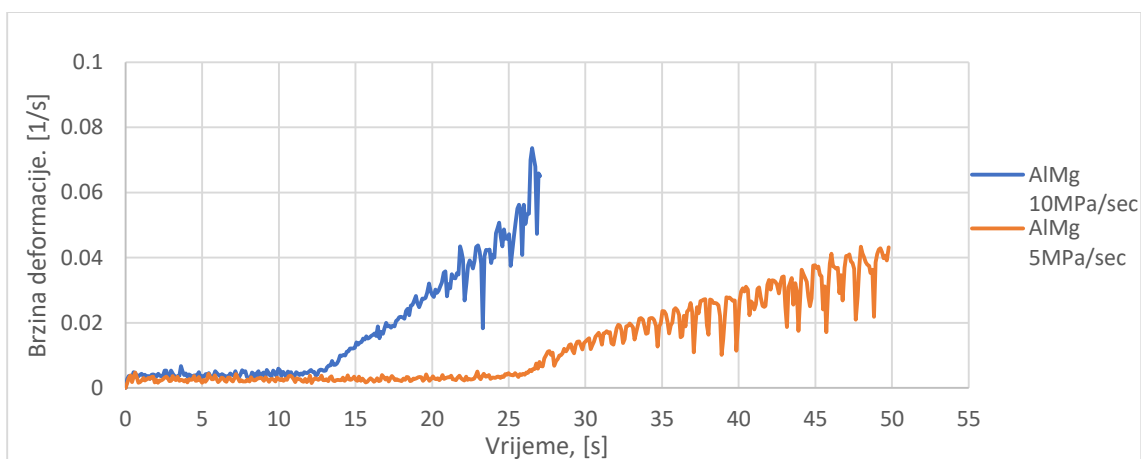


Slika 42. Brzina deformacije pri brzini razvlačenja 20 mm/min



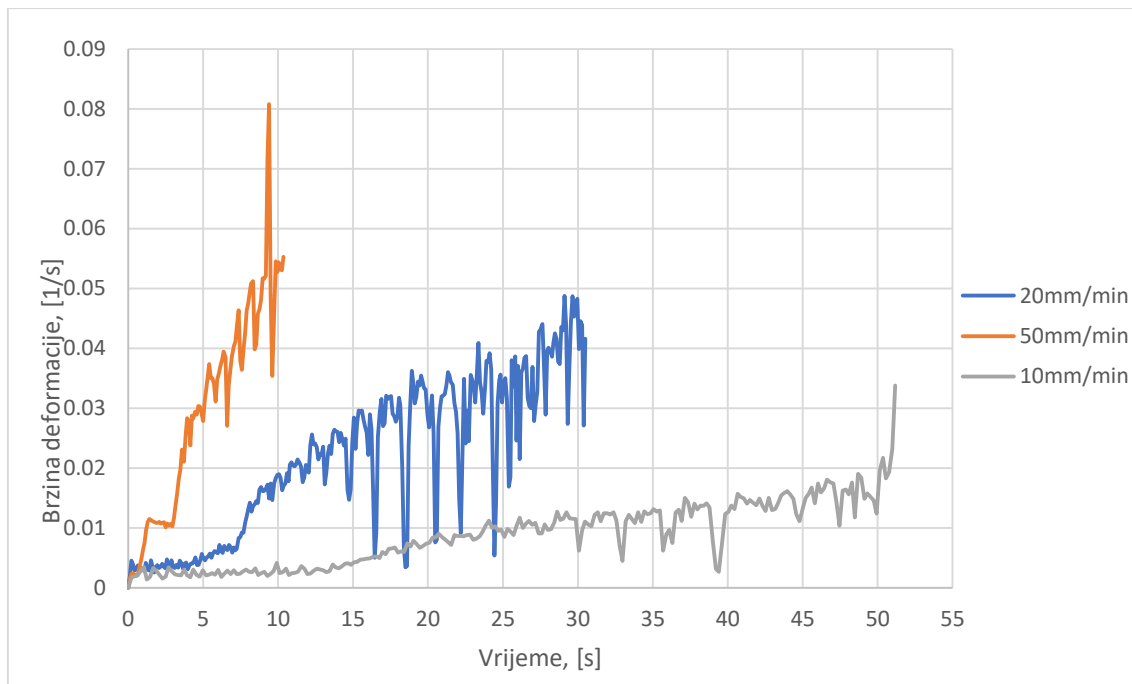
Slika 43. Brzina deformacije pri brzini razvlačenja 50 mm/min

Isto je ponovljeno pri konstantnom porastu naprežanja i to pri dva različita iznosa, slika 44.



Slika 44. Brzina deformacije pri konstantnom prirastu sile

Radi usporedbe i lakšeg razumijevanja utjecaja brzine razvlačenja na brzinu deformacije, konstruiran je usporedni dijagram za sve tri brzine razvlačenja reprezentativnih uzoraka, slika 45.



Slika 45. Usporedni prikaz promjene brzine deformacije u ovisnosti o brzini razvlačenja

Usporedbom izmjerenih brzina deformacija uočljivo je da porastom brzine razvlačenja očekivano raste i brzina deformacije. Pri korištenju konstantnog prirasta napreznja također se uočava porast brzine deformacije s porastom prirasta napreznja.

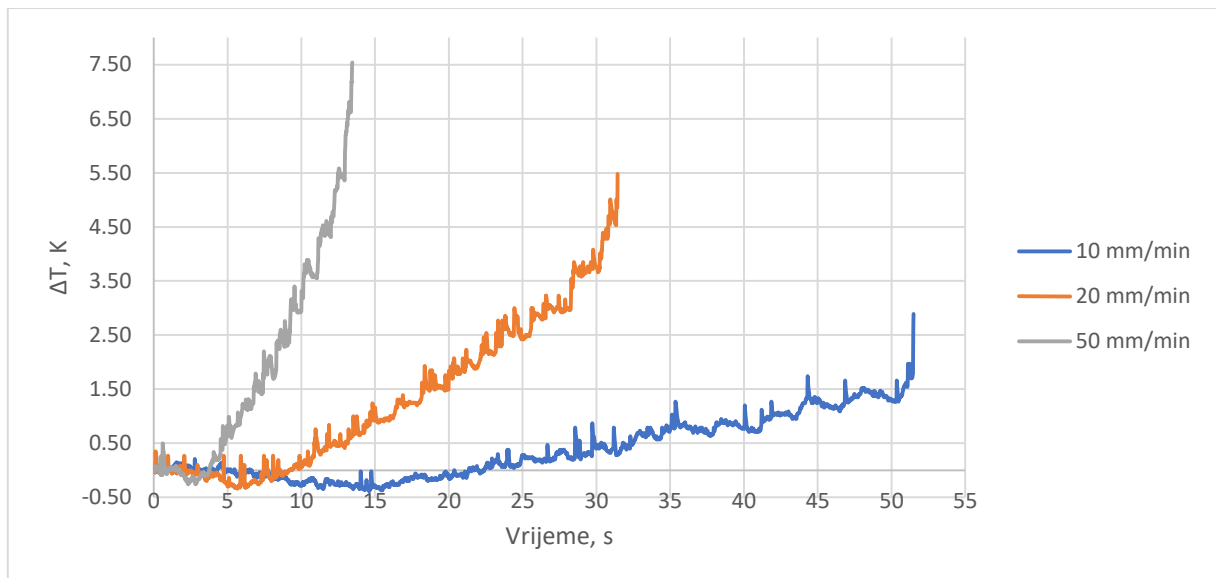
Na dijagramima prikazanim slikom 44 i slikom 45, uočavaju se određeni nagli padovi u mjerenju brzine deformacije. Ti padovi se povezuju s trenucima formiranja PLC linije. Stoga se uzima da pri svakom padu dolazi do formiranja linije, što ukazuje da porastom brzine deformacije ima manje formiranih linija i prije dolazi do očvršćivanja koje dovodi do loma uzoraka.

Dinamika formiranja novih linija je intenzivnija u slučaju veće brzine razvlačenja, točnije pri višim brzinama deformacije. Usporedbom dijagrama dobivenih pri konstantnom povećanju napreznja, vidljivo je kako su te oscilacije manje izražene, te kao da ima više formiranih linija nego pri korištenju konstantne brzine razvlačenja tijekom eksperimenta. Ovo je potrebno još potvrditi daljnjim istraživanjima.

Također, može se uočiti kako je frekvencija pojava pri korištenju prirasta napreznja od 5 MPa/s, gotovo identična pri korištenju brzine razvlačenja od 10 mm/min.

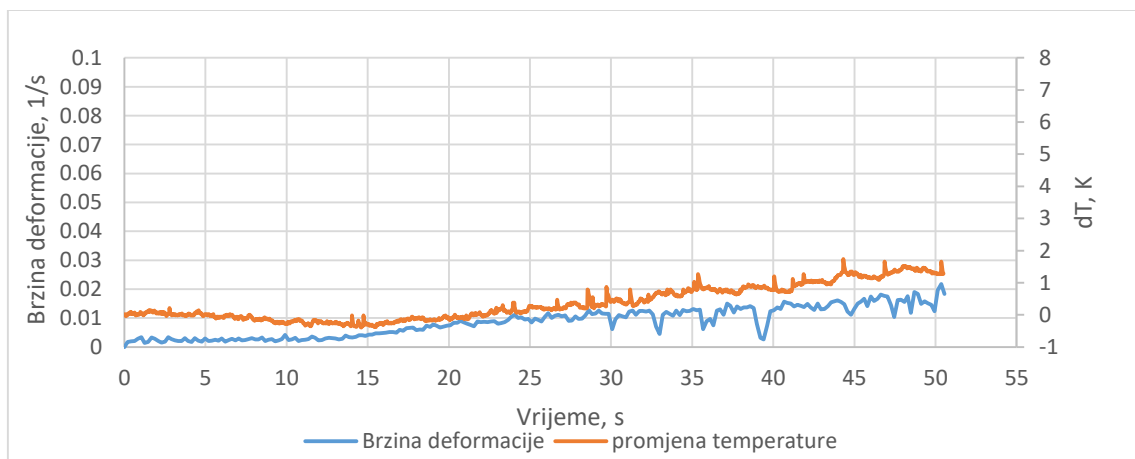
Iz ovih usporedbi može se zaključiti kako neovisno o primijenjenoj brzini razvlačenja, ili korištenjem konstantnog prirasta napreznja, pri svim korištenim uvjetima dolazi do formiranja PLC linija koje postupno deformiraju ispitni dio uzoraka.

Termografska kvantitativna analiza temperaturnih promjena tijekom propagacije PLC linija prikazana je slikom 46.

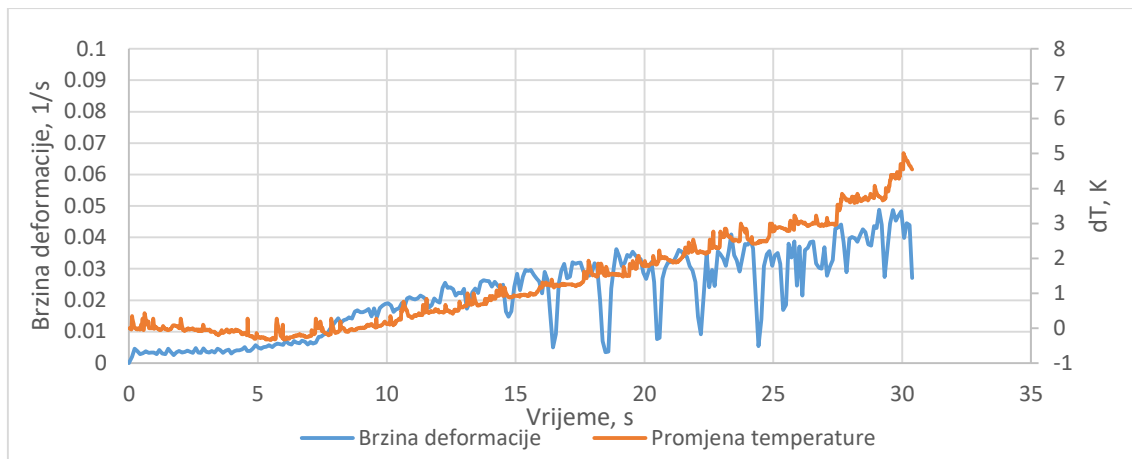


Slika 46. Temperaturne promjene pri različitim brzinama razvlačenja

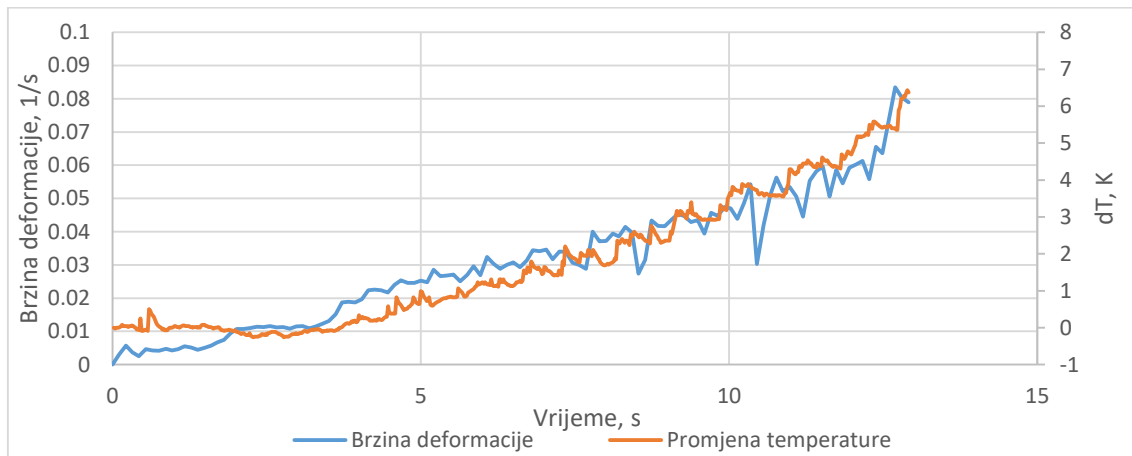
Očekivano, porastom brzine razvlačenja dolazi do porasta u maksimalnoj temperaturnoj promjeni na ispitivanim uzorcima. Kao i kod DIC analize, termografska analiza pokazuje kako tijekom razvlačenja dolazi do skokovitih promjena u temperaturnom prirastu. To se povezuje s formiranjem i propagacijom PLC linija. Usporedbe zabilježenih promjena brzine deformacije i pripadajućih temperaturnih promjena dane su slikama 47-49, za sve tri brzine razvlačenja.



Slika 47. Usporedba brzine deformacije s promjenom temperature pri brzini razvlačenja 10 mm/min



Slika 48. Usporedba brzine deformacije s promjenom temperature pri brzini razvlačenja 20 mm/min



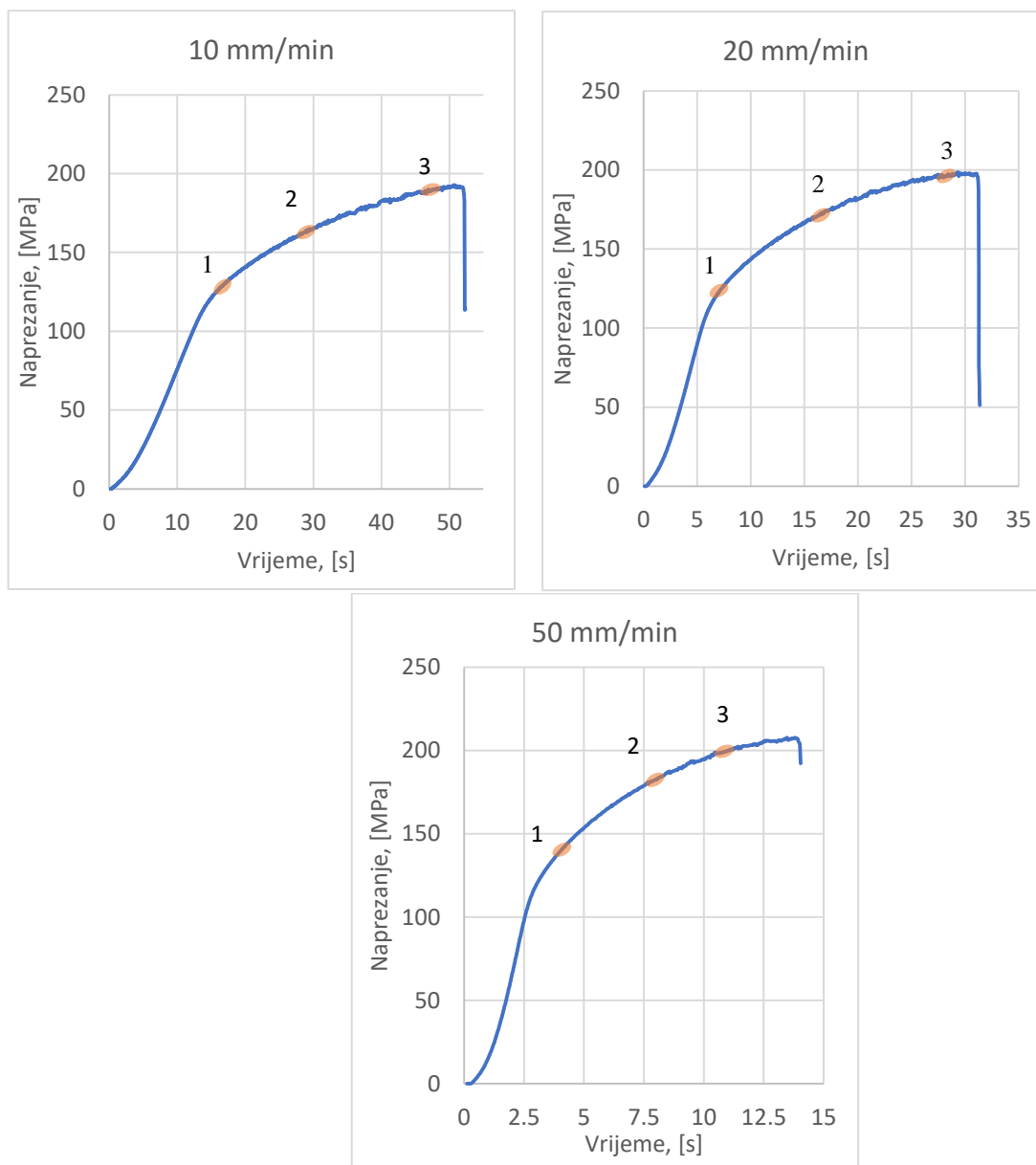
Slika 49. Usporedba brzine deformacije s promjenom temperature pri brzini razvlačenja 50 mm/min

Iz usporedbe snimljenih dijagrama može se primijetiti kako temperaturne promjene prate promjene u brzini deformacije. Točnije tijekom pada brzine deformacije uočavaju se zastoji u temperaturnom prirastu. Razlog tome daje se upravo na formiranje i propagaciju PLC linija. No za točnost ove tvrdnje potrebna su dodatna istraživanja kako bi se povezale dvije pojave. Također nije jasno zašto pri korištenju brzine razvlačenja 20 mm/min mjerimo značajno veće oscilacije u promjeni brzine deformacije.

Daljnji fokus ovih istraživanja stavljen je na utjecaj promjene brzine razvlačenja na brzinu samih PLC linija.

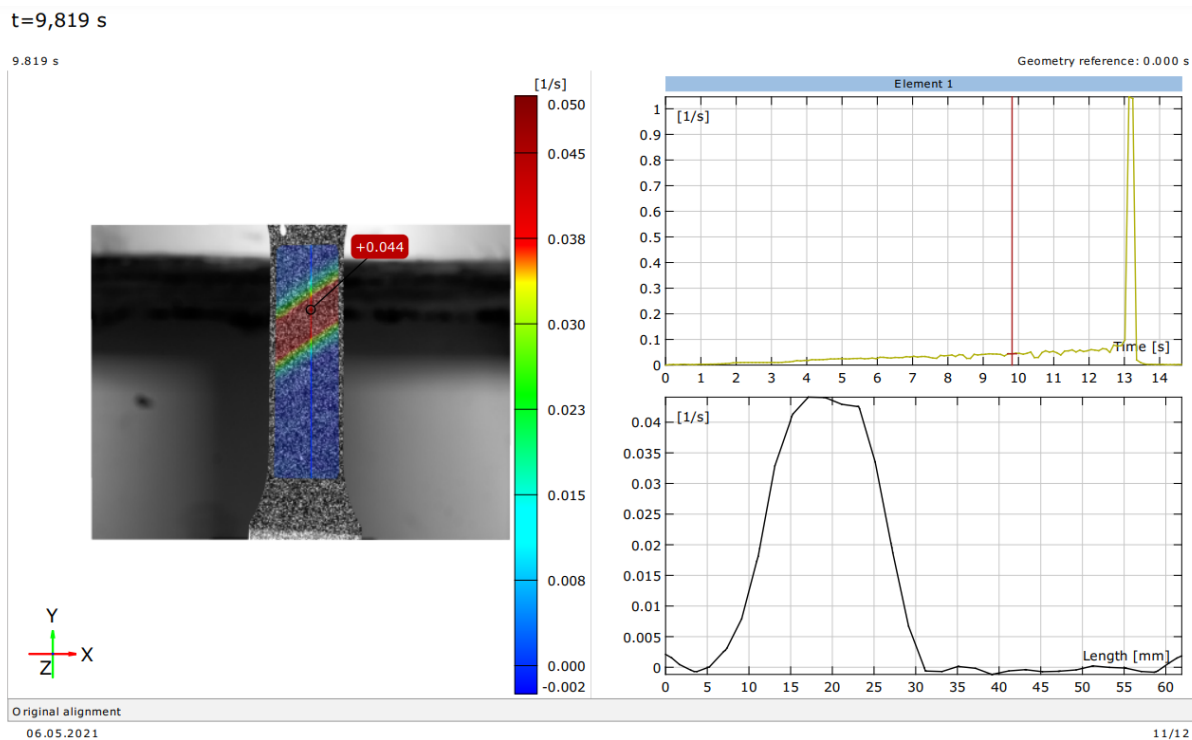
4.3. Utjecaj promjene brzine razvlačenja na brzinu PLC linija

Kako bi ispitali utjecaj brzine razvlačenja na brzinu prostiranja PLC linija, kod svih korištenih brzina razvlačenja u određenim trenutcima izmjerene su brzine prostiranja PLC linija. Brzina PLC linija određena je u početku pojave, oko polovine eksperimenta i u završnim fazama eksperimenta. Periodi mjerenja brzine PLC linija kod sve tri brzine razvlačenja prikazani su elipsama na dijagramima naprezanje-vrijeme dobivenim statičkim vlačnim pokusom, slika 50.



Slika 50. Dijagrami naprezanje-vrijeme s označenim mjestima mjerenja brzine PLC linija

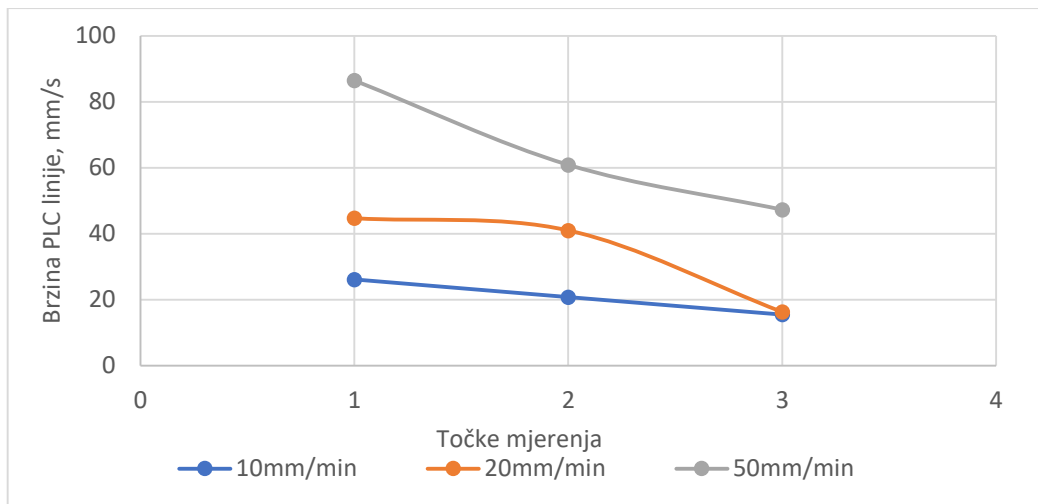
Određivanje brzine linija vršeno je DIC metodom na način da se u trenutku kada je formirana linija zabilježila njena pozicija i vrijeme, slika 51 prikazuje trenutak kada je formirana linija na jednom uzorku.



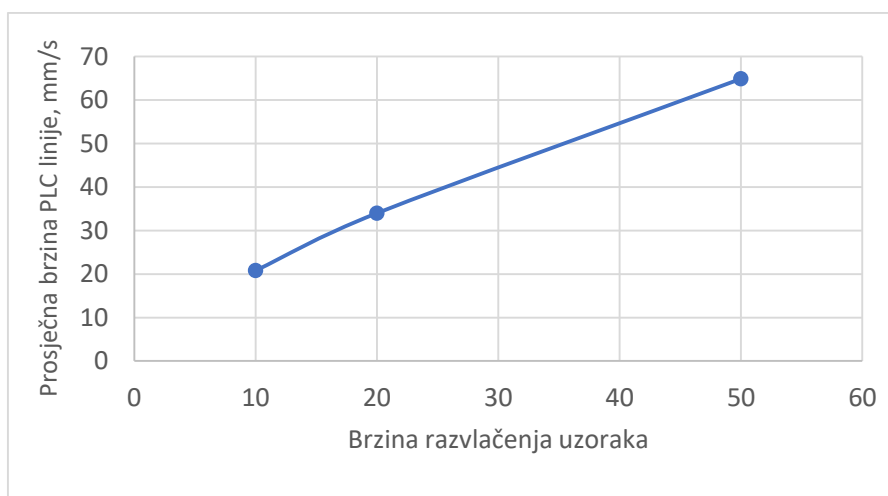
Slika 51. Primjer očitavanja vremena i pozicije linije pri određivanju brzine PLC linija

Nakon toga se linija prati sve dok ne dođe do kraja uzorka, odnosno njenog poništavanja, pri čemu se bilježi njen krajnji položaj i očitava točno vrijeme. Iz početne i konačne pozicije jednostavnim izračunom odredi se put koji je PLC linija prošla duž uzorka, te dijeljenjem s vremenom koje je za taj put bilo potrebno izračunate su vrijednosti brzine PLC linija za svaki period prikazan slikom 51.

Iz dobivenih vrijednosti konstruirani su dijagrami ovisnosti brzina PLC linija o brzini razvlačenja i periodu eksperimenta u kojem se javljaju. Također je izračunata prosječna brzina linija kao srednja vrijednost za sva tri perioda, slika 52.



a)



b)

Slika 52. Ovisnost brzine PLC linija o brzini razvlačenja

- a) brzine PLC linija pri različitim brzinama ispitivanja i pri različitim stupnjevima deformacije
- b) prosječne brzine PLC linija pri različitim brzinama razvlačenja

Dijagram promjene brzine PLC, slika 52. a), prikazuje izmjerene brzine PLC linija u različitim stupnjevima deformacije. Točke 1, 2, 3, prikazuju mjesta formiranja PLC linija pri različitim stupnjevima deformacije, a što je prikazano za svaku korištenu brzinu ispitivanja slikom 50. Iz konstruiranog dijagrama, jasno je uočljivo kako porastom brzine razvlačenja raste i brzina samih PLC linija. To se prvenstveno vidi iz prosječnih vrijednosti izmjerenih brzina PLC-a, slika 52. b).

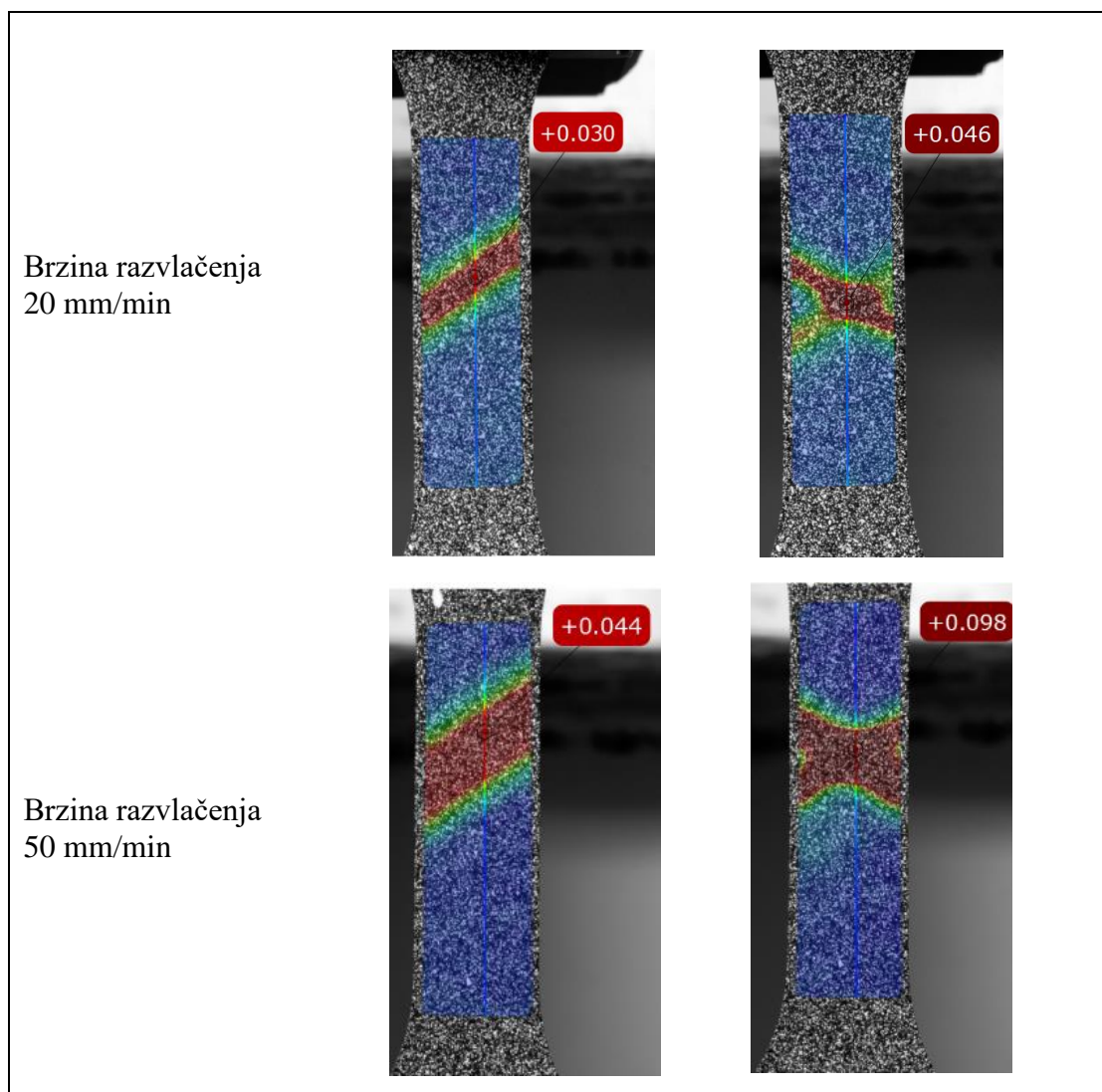
Svaka pojedina linija na dijagramu 52. a) prikazuje jednu brzinu ispitivanja, odnosno očitane vrijednosti brzine PLC linija pri različitim stupnjevima deformacije. Ono što je iz toga jasno vidljivo je da kod svih brzina razvlačenja, s porastom stupnja deformacije, dolazi do pada u brzini kretanja PLC linija unutar uzorka, te se paralelno istovremeno javlja sve više i više linija.

Mišljenje je da do smanjenja brzine linija dolazi uslijed porasta gustoće dislokacija, čime materijal očvršćava i otežano je daljnje gibanje dislokacija. Ako uzmemo u obzir jednu od teorija

da su PLC linije u stvari klasteri dislokacija koje se kreću zajedno duž ispitivanog komada, jasno je da otežanim kretanjem dislokacija dolazi do usporavanja istih. Uslijed toga detektiramo i sporije kretanja PLC linija.

Detektirano smanjenje brzine prostiranja linija javlja se kod sve tri korištene brzine razvlačenja te iz provedenih analiza nije moguće dati detaljnije međuovisnosti.

Usporedbom izgleda pojedinih PLC linija u ovisnosti o korištenoj brzini razvlačenja, uočeno je kako promjena brzine razvlačenja utječe na debljinu samih linija, slika 53.



Slika 53. Vizualni prikaz DIC analize te razlike u debljini linija u ovisnosti o brzini razvlačenja

Ovu pojavu nije moguće pojasniti provedenim ispitivanjima. Jedina je pretpostavka da pri višim brzinama razvlačenja dolazi do značajno višeg skoka u naprezanju. To dovodi do visokih iznosa naprezanja koje sada može pomaknuti veći broj dislokacija istovremeno. Slijedom toga dolazi do pomicanja dislokacija na nešto većoj površini uzorka, te uslijed toga detektiramo veću površinu samih linija.

5. ZAKLJUČAK

Istraživanja u ovom diplomskom radu su bila usmjerena na određivanje utjecaja parametara deformacije kao što je brzina razvlačenja i korištenje konstantnog prirasta naprezanja na pojavu i tijek PLC efekta.

U tu svrhu provedeno je statičko vlačno ispitivanje uzoraka pri različitim brzinama razvlačenja i naknadno pri konstantnom prirastu naprezanja. Paralelno statičkom vlačnom pokusu primijenjene su metode termografije i digitalne korelacije slika (DIC).

Iz analize rezultata istraživanja i usporedbom međuovisnosti promjene parametara razvlačenja uzoraka, doneseni su slijedeći zaključci.

Potvrđeno je da pri hladnoj deformaciji tijekom statičkog vlačnog opterećenja na uzorcima AlMg4,5 legure dolazi do pojave nehomogene deformacije koja je povezana s PLC efektom.

Navedena pojava se javlja kod svih korištenih parametara ispitivanja, brzine razvlačenja od 10 do 50 mm/min i pri konstantnom porastu naprezanja od 5 do 10 MPa/sec.

Ono što se jasno uočava iz prikazanih dijagrama naprezanje-deformacija je da na dijagramima nema karakteristične točke vlačne čvrstoće. Pretpostavka je da upravo te nestabilnosti plastičnog toka dovode do konstantnog ojačanja sve do dostizanja maksimalnog naprezanja u trenutku loma uzoraka.

Metode DIC i termografija potvrđuju da se linije formiraju kroz cijeli period plastične deformacije sve do loma uzoraka te povećanjem stupnja deformacije, dolazi do bržeg formiranja novih linija, a pred sami lom i do formiranja istovremeno više linija.

Usporedbom izmjerenih brzina deformacija DIC metodom uočljivo je da porastom brzine razvlačenja očekivano raste i brzina deformacije, isto je zabilježeno pri korištenju konstantnog prirasta naprezanja kada se povećava iznos prirasta naprezanja.

Uočava se da pri praćenju brzine deformacije DIC metodom dolazi do određenih skokovitih padova u iznosu brzine deformacije. Deformacija ukupno raste, no u određenim periodima skokovito pada sama brzina deformacije. Usporedbom s temperaturnim dijagramima zaključuje se da temperaturne promjene prate promjene u brzini deformacije. To se povezuje s formiranjem novih linija, te su potrebna detaljnija istraživanja u tom području.

Uočava se da porast brzine razvlačenja, kao i porast iznosa prirasta naprezanja, dovodi do bržeg formiranja većeg broja PLC linija, te su veći skokovi u iznosu promjene brzine deformacije.

Porastom brzine razvlačenja raste i brzina samih PLC linija, što je očito iz prosječnih vrijednosti izmjerenih brzina PLC linija.

Zanimljiv rezultat mjerenja je da se porastom stupnja deformacije, kod svih brzina razvlačenja, brzina PLC linija smanjuje, te se paralelno istovremeno javlja sve više linija. Ovo se povezuje s hladnim ojačanjem materijala, te uslijed veće gustoće dislokacija dolazi do formiranja višestrukih linija, koje se sporije kreću. No za potvrdu ove teze potrebna su dodatna istraživanja samih brzina linija i određivanja gustoće dislokacija.

6. LITERATURA

- [1] <http://www.dtzi.hr/upload/pdf/5.%20SEMINAR/1.%20RAD.pdf> (20.8.2022)
- [2] A. Mogucheva, M. Saenko, R. Kaibyshev, The Portevin–Le Chatelier Effect in an Al-Mg Alloy, Belgorod State University, Belgorod, Russia, AIP Conference Proceedings 1783, 2016.
- [3] M.A. Lebyodkin, Tatiana A Lebedkina. The Portevin-Le Chatelier Effect and Beyond, J. Brechtel, P.K. Liaw. High-Entropy Materials, Theory, Experiments, and Applications, Springer Nature Switzerland AG, 2021.
- [4] J. Xu, G. Chen, S. Fu, Complexity analysis of the Portevin-Le Chatelier in an Al alloy at different temperatures, Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2021.
- [5] N. Dolić, Metalurgija aluminija, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2015.
- [6] <https://materialsdata.nist.gov/bitstream/handle/11115/173/Aluminum%20and%20Aluminum%20Alloys%20Davis.pdf> [22.8.2022]
- [7] <https://stock.adobe.com/hr/images/aluminum-nuggets-aluminum-is-a-chemical-element-of-the-symbol-al-and-atomic-number-13-with-mass-27-u-at-room-temperature-it-is-solid-being-the-most-abundant-metallic-element-of-the-earth-s-crust/294528231> (22.8.2022.)
- [8] C. Vargel, Corrosion of aluminium, Oxford, Elsevier, 2004.
- [9] <https://www.archdaily.com/tag/aluminium> (26.8.2022)
- [10] K. Štengl, Utjecaj brzine hlađenja na mikrostrukturna i mehanička svojstva aluminijske legure EN AW-5754, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2017.
- [11] EN 573-3:2002, Aluminium and Aluminium Alloys – Chemical composition and Form of Wrought Products – Part 3: Chemical Composition, European Comitee for Standardization, Brussels, 2002.
- [12] L. Vrsalović, Studija inhibitorskog djelovanja fenolnih kiselina na koroziju Al-Mg slitina, Doktorski rad, Split, 2008.
- [13] EN 1706:2010 Aluminum and aluminum alloys – Castings – Chemical compositions and mechanical properties
- [14] Ljevački priručnik, Savez ljevača Hrvatske, Zagreb, 1984.
- [15] N. Hiromi, Effects of Mg contents on porosity formation in Al-Mg alloy DC slabs, J. Jap. Inst. Light Met. Vol. 52 No.7, (2002), 293-297.
- [16] A. Chaijaruanich, Evolution of pore morphology and distribution during the homogenization of direct chill cast Al–Mg alloys, Acta Mater. 55, (2007), 285-293.
- [17] T. Klinac, Utjecaj klorida na brzinu korozije kod aluminijskih legura, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [18] J. L. Searles, P. I. Gouma, R. G. Buchheit, Stress corrosion cracking of AA5083 (Al-4,5Mg-1.0Mn), Metall. Mater. Trans. A 32A, 2001.
- [19] I. Kerekeš, Osnove ljevarstva, Viša tehnička škola u Novom Sadu, Novi Sad, 1977.
- [20] S. Rešković, Teorija oblikovanja deformiranjem, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2014.

- [21] T. Brlić, Pojava Lüdersovih linija kod niobijem mikrolegiranoga čelika, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2020.
- [22] B. Grizelj, Oblikovanje metala deformiranjem, Umformtechnik, Metal Forming. Slavonski Brod: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku; Strojarski fakultet u Slavskom Brodu; 2018.
- [23] M. Lisičar, Konstrukcija alata za duboko vučenje lima za automobilsku industriju, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [24] S. Kumar, Povoden-Karadeniz E. Plastic, Deformation Behavior in Steels during Metal Forming Processes: A Review, Material Flow Analysis, 2021.
- [25] Dž. Hadžihavizović, Proces plastičnog deformisanja sa stanovišta fizike metala, Sarajevo, 2019.
- [26] D. Hull, D. J. Bacon, Introduction to Dislocations, fifth edition, published by Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2011.
- [27] T. Kayser, Characterization of microstructure in aluminum alloys based on electron backscatter diffraction, Der Fakultat Maschinenbau, der Technischen Universitat Dortmund, genehmigte Dissertation, Dortmund, 2011.
- [28] M. Math, Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [29] J. Gubicza, N. Q. Chinh, Z. Horita, T. G. Langdon, Effect of Mg addition on microstructure and mechanical properties of aluminum, Mater. Sci. Eng., (2004), A 387-389,
- [30] W. Wen, Y. Zhao, J. G. Morris, The effect of Mg precipitation on the mechanical properties of 5xxx aluminum alloys, Mater. Sci. Eng., (2005) A 392
- [31] Zs. Kovács, J. Lendvai, G. Vörös, Localized deformation bands in Portevin – Le Châtelier plastic instabilities at a constant stress rate, Mater. Sci. Eng., (2000), A 279
- [32] S. V. Franklin, F. Mertens, M. Marder, Portevin-Le Chatelier effect, Physical Review E, Center for Nonlinear Dynamics and Department of Physics, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, 2000.
- [33] A. Portevin, F. le Chatelier, Heat treatment of aluminum-copper alloys [J]. Transactions of the American, Society of Steel Treating, (1924), 5: 457–478.
- [34] A. Yilmaz, The Portevin – Le Chatelier effect: a review of experimental findings, Sci. Technol. Adv. Mater. 12 (2011) 063001 (16pp)
- [35] M. Mazière, J. Besson, S. Forest, B. Tanguy, H. Chalons, F. Vogel, Numerical aspects in the finite element simulation of the Portevin–Le Chatelier effect, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 199, 2010.
- [36] S. Tamimi, A. Andrade-Campos, J. Pinho-da-Cruz, Modelling the Portevin-Le Chatelier effects in aluminium alloys: a review, Published by De Gruyter, 2015.
- [37] P. Zhang, G. Liu, J. Sun, A critical review on the Portevin-Le Chatelier effect in aluminum alloys, State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi’an Jiaotong University, Central South University, 2022.
- [38] T. Mäkinen, Portevin-Le Chatelier effect in aluminum alloy, Master’s Thesis, Aalto University, Espoo, 2016
- [39] X. Zhang, R. Dong, Y. Zhao, D. Liu, L. Yang, H. Hou, Serrated flow behaviors in a Ni-based superalloy, Mater. Res. Express 8, (2021), 026515

- [40] S. Yoshida, S. Sadeq, Wave dynamics of deformation and fracture, American Institute of Physics, AIP Conference Proceedings, 2017.
- [41] C. Faciu, Modelling the Portevin-Le Chatelier effect – A study on plastic instabilities and pattern formation, 2016.
- [42] M. Wagenhofer, M. A. Erickson-Natishan, R. W. Armstrong, Influences of Strain Rate and Grain Size on Yield and Serrated Flow In Commercial Al-Mg Alloy 5086, Scripta Mater. Vol. 41 No. 11, 1999.
- [43] J. M. Robinson, Aspects Of Serrated Flow In Aluminium Alloys, Doctors Thesis, Department of Materials Engineering, University of Cape Town, 1992.
- [44] S. Joshi, C. Eberl, B. Cao, K.T. Ramesh, On the Occurrence of Portevin–Le Châtelier Instabilities in Ultrafine-Grained 5083 Aluminum Alloys, Society for Experimental Mechanics, 2009.
- [45] D. Šega, Maketa kidalice za ispitivanje vlačnog naprezanja, Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2017.
- [46] S. Rešković, Ispitivanje materijala, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2009
- [47] R. K. Firouzjaei, Digital Image Correlation (DIC) and Experimental Testing of Masonry Samples, Msc Dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) and Universidade do Minho (UM), 2016.
- [48] M. Aydin, X. Wu, K. Cetinkaya, I. Kadi, M. Yasar, Application of Digital Image Correlation in Uniaxial Tensile Test, EJENS, Volume 1, Issue 1, 2016.
- [49] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/15/9/R01/meta> (5.9.2022.)
- [50] P. Marenić, T. Veljača, L. Krstulović-Opara, Ž. Domazet, Uvod u termoelastičnu analizu naprezanja, Drugi susret Hrvatskog društva za mehaniku, Split, 2008.
- [51] [Scheme-for-research-positions-thermography-a-one-sided-a-two-sided.ppm \(850x341\) \(researchgate.net\)](#) (7.9.2022.)
- [52] H. Ait-Amokhtar, C. Fressengeas, S. Boudrahema, The dynamics of Portevin–Le Chatelier bands in an Al–Mg alloy from infrared thermography, Materials Science and Engineering A 488, (2008), 540–546
- [53] P. Zorko, Svojstva, primjena i zaštita od infracrvenog zračenja, Završni rad, Sveučilište u Karlovcu, Karlovac, 2020.
- [54] I. Jandrlić, Raspodjela naprezanja u zoni deformacije niobijem mikrolegiranog čelika, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, 2015

ŽIVOTOPIS

OSOBNI PODACI:

Ime i prezime: Milica Vučenović

Datum i mjesto rođenja: 1.4.1997., Prijedor

Adresa: Rudolfa Horvata 19, Petrinja

Telefon: 0915277366

E-mail: milica.vucenovic14@gmail.com

OBRAZOVANJE:

2020.-2022. – Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, diplomski sveučilišni studij Metalurgija, smjer Metalurško inženjerstvo

2016.-2020. – Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija, smjer Metalurško inženjerstvo

2011.-2015. – Tehnička škola Sisak, smjer Tehničar za elektroniku

2003.-2011. – Osnovna škola Mate Lovraka, Petrinja

RADNO ISKUSTVO:

2020. – Applied Ceramics d.o.o. (stručna praksa)

2018.-2023. Exclusive Change d.o.o. (studentski rad)

2016.-2017. – BauWelt Sisak (studentski rad)

OSOBNNE VJEŠTINE:

Poznavanje rada na računalu: operativni sustav Windows, MS Office, SolidWorks, AutoCAD, ProCAST

Strani jezik: engleski jezik

Vozački ispit: B kategorija

Spremnost na učenje i usavršavanje znanja.