

# Karakteristike pojave Portevin-Le Chatelier efekta kod AlMg legura tijekom hladne deformacije

---

**Kovačević, Domagoj**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*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:115:984493>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-19**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Domagoj Kovačević

DIPLOMSKI RAD

Sisak, listopad 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Domagoj Kovačević

KARAKTERISTIKE POJAVE PORTEVIN-LE CHATELIER EFEKTA KOD  
AlMg LEGURA TIJEKOM HLADNE DEFORMACIJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv.prof.dr.sc. Ivan Jandrlić

Stručni voditelj: Lorena Mrkobrada, mag.ing.met.

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada:

Predsjednica: doc.dr.sc. Ivana Ivanić

Član: izv.prof.dr.sc. Ivan Jandrlić

Član: doc.dr.sc. Tin Brlić

Zamjenski član: prof.dr.sc. Ljerka Slokar Benić

Sisak, listopad 2022.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

IME: Domagoj

PREZIME: Kovačević

MATIČNI BROJ: 0124123954

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

## IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj diplomski rad pod naslovom:

KARAKTERISTIKE POJAVE PORTEVIN-LE CHATELIER EFEKTA KOD AlMg LEGURA TIJEKOM

HLADNE DEFORMACIJE

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

Sisak, rujan, 2022.

Domagoj Kovačević

(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 Europskog fonda za regionalni razvoj putem Ograničenog poziva na dostavu projektnih prijedloga „Ulaganje u organizacijsku re-formu i infrastrukturu u sektoru istraživanja, razvoja i inovacija“.

## ZAHVALA

*Posebno se zahvaljujem svom mentoru doc.dr.sc. Ivanu Jandrliću na prenesenom znanju, savjetima pri izradi diplomskog rada, te za odvojeno vrijeme i strpljenje kako bi se izradio ovaj diplomski rad.*

*Zahvaljujem se stručnoj voditeljici Loreni Mrkobradi, mag.ing.met. na uloženom vremenu pri ispitivanju uzoraka i na korisnim savjetima koji su mu olakšali pisanje ovog diplomskog rada.*

*Zahvaljujem se i svim djelatnicima Metalurškog fakulteta na prenesenom znanju, trudu i pomoći tijekom studiranja, a bez čega izrada ovog diplomskog rada ne bi bila moguća.*

*Na kraju, najveća hvala mojoj obitelji, prijateljima i kolegama na strpljenju, pomoći i poticaju tijekom mojeg studiranja i izrade diplomskog rada*

## SAŽETAK

### **Karakteristike pojave Portevin-Le Chatelier efekta kod AlMg legura tijekom hladne deformacije**

Aluminij i aluminijske legure su posljednjih godina postali nezamjenjiv materijal u mnogim industrijama. Neke legure aluminija pokazuju lokaliziranu deformaciju, takozvani Portevin-Le Chatelier efekt pri određenim brzinama deformacije i temperaturama. Takva lokalizirana deformacija uzrokuje razne probleme u industriji. Iz tog razloga je potrebno saznati više o Portevin-Le Chatelier efektu. U ovom radu istraživana je karakteristika pojave Portevin-Le Chatelier efekta kod AlMg legure tijekom hladne deformacije metodama statičkog vlačnog pokusa, termografije, digitalne korelacije slike (DIC) i metalografskom analizom mikrostrukture. Istraživanjem je utvrđena pojava Portevin-Le Chatelier efekta kod AlMg legure. Metodom digitalne korelacije slike je utvrđeno kako je pojava Portevin-Le Chatelier efekta brza i jasno uočljiva na DIC videu te kako dolazi do skokovitih promjena u deformaciji. Iz rezultata dobivenih metodom termografije je utvrđeno da tijekom skokovitog porasta u deformaciji dolazi do skokovitog porasta u temperaturi. Utvrđeno je da su skokovite promjene u deformaciji i temperaturi međusobno povezane. Ispitivanjem mikrostrukture je utvrđeno da je ispred PLC linije lijevana struktura, a na samoj liniji fronte dolazi do znatne deformacije i preorijentiranja zrna u smjeru razvlačenja.

Ključne riječi: Portevin-Le Chatelier efekt, AlMg legura, statički vlačni pokus, digitalna korelacija slike (DIC), termografija.

## ABSTRACT

### **Characteristics of the appearance of the Portevin-Le chatelier effect in AlMg alloys during cold deformation**

In recent years, aluminum and aluminum alloys have become an irreplaceable material in many industries. Some aluminum alloys exhibit localized deformation, the so-called Portevin-Le Chatelier effect, at certain deformation rates and temperatures. Such localized deformation causes various problems in industry. For this reason, it is necessary to learn more about Portevin-Le Chatelier effect. In this paper, the characteristics of the appearance of the Portevin-Le Chatelier effect in AlMg alloys during cold deformation were investigated by static tensile test, thermography, digital image correlation and metallographic microstructure analysis. Research determined the occurrence of the Portevin-Le Chatelier effect in the investigated AlMg alloy. Using the digital image correlation, it was determined that the appearance of the Portevin-Le Chatelier effect is fast and clearly visible phenomenon on the DIC video, and that during it sudden changes in deformation occur. During analysis using thermography method, it was determined that there are sudden increase in temperature. It was determined that sudden changes in deformation and in temperature are connected. Investigation of the microstructure revealed that in front of the PLC line there is a casting structure, at the front line itself there is considerable deformation and reorientation of the grains in the direction of stretching.

Key words: Portevin-Le Chatelier effect, AlMg alloy, static tensile test, digital image correlation (DIC), thermography.

## Sadržaj

Popis slika .....	I
Popis tablica .....	II
1. UVOD .....	1
2. TEORIJSKI DIO .....	2
2.1. Aluminij.....	2
2.1.1. Legure aluminija i magnezija.....	4
2.2. Mehanizmi očvršćivanja Al legura .....	5
2.2.1. Dislokacije.....	6
2.2.2. Hladna plastična deformacija .....	8
2.3. Portevin-Le Chatelier-ov efekt.....	9
2.3.1. Mehanizam nastajanja PLC efekta .....	11
2.4. PLC linije.....	13
2.4.1. PLC linije tipa A .....	14
2.4.2. PLC linije tipa B .....	14
2.4.3. PLC linije tipa C .....	15
2.4.4. Ostale PLC linije.....	15
2.5. PLC efekt u čelicima i ostalim metalnim legurama .....	15
2.6. PLC efekt u Al legurama .....	16
3. METODE ISTRAŽIVANJA PORTEVIN-LE CHATELIEROVOG EFEKTA.....	18
3.1. Statičko vlačno ispitivanje.....	18
3.2. Infracrvena termografija .....	20
3.3. Digitalna korelacija slike .....	22
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	24
4.1. Uzorci .....	24
4.2. Metode ispitivanja .....	24
4.2.1. Statičko vlačno ispitivanje.....	24
4.2.2. Metoda termografije .....	25
4.2.3. Metoda digitalne korelacije slike (DIC) .....	28
4.2.4. Metalografska analiza.....	30
5. REZULTATI I RASPRAVA .....	33
5.1. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja.....	33
5.2. Rezultati analize kvalitativnih vrijednosti dobivenih metodom digitalne korelacije slike (DIC).....	35



5.3. Rezultati analize kvalitativnih vrijednosti dobivenih metodom termografije .....	36
5.4. Rezultati analize kvantitativnih vrijednosti dobivenih metodom termografije .....	37
5.5. Rezultati analize kvantitativnih vrijednosti dobivenih metodom digitalne korelacije slike (DIC) .....	39
5.6. Rezultati usporedne analize dijagrama dobivenih DIC i termografskom analizom .....	40
5.7. Rezultati ispitivanja mikrostrukture u trenutku nastajanja PLC linije .....	41
6. ZAKLJUČAK .....	49
7. LITERATURA .....	50
8. ŽIVOTOPIS .....	54

## Popis slika:

Slika 1. Prikaz plošno centrirane kubične rešetke aluminija [7].	2
Slika 2. Prikaz aluminijske folije [8].	2
Slika 3. Prikaz dislokacijske linije, ravnine klizanja i vektora klizanja za a) rubnu dislokaciju i za b) zavojna dislokacija [14].	6
Slika 4. Prikaz mehanizma Franka i Reada [16].	7
Slika 5. Prikaz mehanizma višestrukog poprečnog klizanja [15].	7
Slika 6. Prikaz interakcije precipitata i dislokacija, a) zaobilaženja dislokacija i b) presijecanja dislokacija [19].	8
Slika 7. Prikaz krivulje očvršćivanja drugog reda [11].	9
Slika 8. Usporedba nazubljene krivulje ( gore) i nenazubljene linije (dolje) [4].	10
Slika 9. Prikaz interakcije otopljenih elemenata i pokretnih dislokacija [38].	11
Slika 10. Prikaz nazubljene linije za leguru AlMg <sub>4,5</sub> .	12
Slika 11. Prikaz N krivulje (lijevo) sa pozitivnim područjem osjetljivosti na brzinu deformacije (a) i sa negativnim područjem osjetljivosti na brzinu deformacije (b), sa naznačenim pripadajućim krivuljama na krivulji naprezanje-brzina deformacije [28].	12
Slika 12. Prikaz krivulje ovisnosti brzine deformacije izražene logaritamski o temperaturi, PLC efekt se pojavljuje u području gdje je $m < 0$ [22].	13
Slika 13. Shematski prikaz kretanja, orijentacije i nazubljene krivulje za linije tipa A [4].	14
Slika 14. Shematski prikaz kretanja, orijentacije i nazubljene krivulje za linije tipa B [4].	14
Slika 15. Shematski prikaz kretanja, orijentacije i nazubljene krivulje za liniju tipa C [4].	15
Slika 16. Prikaz ostalih PLC linija [12].	15
Slika 17. Prikaz uzorka za statičko vlačno ispitivanje , $L_0$ označava mjerni dio ispitnog uzorka.[51].	18
Slika 18. Prikaz dijagrama sila produljenje sa naznačenim karakterističnim točkama [52].	19
Slika 19. Shematski prikaz mjerenja infracrvenom termografijom [56].	22
Slika 20. Shematski prikaz mjerenja metodom digitalne korelacije slike [59].	23
Slika 21. a) prikaz područja interesa i mjernog polja na uzorku, b) shematski prikaz principa korelacije između referentne slike i slike nakon deformacije [61]	23
Slika 22. Prikaz ispitnog uzorka.	24
Slika 23. Prikaz kidalice Hegewald & Peschke Inspekt table 100.	25
Slika 24. Prikaz Jenoptik VarioCAM® M82910.	26
Slika 25. Prikaz termalne kamere Jenoptik VarioCAM® M82910 tijekom statičnog vlačnog pokusa.	26
Slika 26. Prikaz ispitnih uzoraka za ispitivanje a) bez premaza i s b) crnim mat premazom.	26
Slika 27. Prikaz parametara u programu IEBIS 3 Professional.	27
Slika 28. Prikaz sučelja programa IRBIS3 Professional.	27
Slika 29. Prikaz analize na cijeloj površini uzorka.	28
Slika 30. Prikaz ispitnog uzorka sa nasumično nanešenim bijelim markerima.	28
Slika 31. Prikaz kamere za DIC.	29
Slika 32. Prikaz sučelja korelacijskog programa GOM CORRELATE2020.	29
Slika 33. Fotografija uređaja za rezanje uzoraka Buehler ABRASIMET 2.	30
Slika 34. Fotografija uređaja za ulaganje uzoraka SimpliMet1000.	31
Slika 35. Fotografija uređaja za brušenje i poliranje PHOENIX BETA GRINDING/POLISHER.	31
Slika 36. Fotografija optičkog mikroskopa Olympus GX51 s kamerom DP70.	32
Slika 37. Dijagram sila-produljenje dobiven statičkim vlačnim ispitivanjem na uzorcima iz legure AlMg <sub>4,5</sub>	33

Slika 38. Usporedni prikaz dijagrama sila produljenje nisko-ugličnog čelika i AlMg4,5 legure.....	34
Slika 39. DIC prikaz formiranja i propagacije višestrukih linija. ....	35
Slika 40. Termografski prikaz formiranja i propagacije višestrukih PLC linija. ....	36
Slika 41. Dijagram promjene temperature tijekom statičkog vlačnog deformiranja ispitivane legure AlMg4,5, primjer 1.....	37
Slika 42. Dijagram promjene temperature tijekom statičkog vlačnog deformiranja ispitivane legure AlMg4,5, primjer 2.....	38
Slika 43. Ukupna deformacija DIC analizom za primjer 1. ....	39
Slika 44. ukupna deformacija DIC analizom za primjer 2.....	39
Slika 45. Usporedni dijagram temperaturene promjene i DIC analize deformacije za primjer 1. ....	40
Slika 46. Usporedni dijagram temperaturene promjene i DIC analize deformacije za primjer 2 .....	41
Slika 47. Određivanje mjesta linije nakon zaustavljanja DIC metodom.....	42
Slika 48. Pozicije snimanja strukturnih snimki. ....	42
Slika 49. Početno stanje AlMg4,5 legure pri povećanju 50 x. ....	43
Slika 50. Početno stanje AlMg4,5 legure pri povećanju 100 x. ....	43
Slika 51. Mikrostruktura na PLC liniji pri povećanju 50 x. ....	44
Slika 52. Mikrostruktura na PLC liniji pri povećanju 200x. ....	44
Slika 53. Mikrostruktura na PLC liniji pri povećanju 500x. ....	45
Slika 54. Mikrostruktura nakon prolaska PLC linije pri povećanju 200x.....	45
Slika 55. Mikrostruktura nakon prolaska PLC linije pri povećanju 500x.....	46
Slika 56. Dijagram sila-produljenje s uvećanim segmentom.....	47
Slika 57. DIC prikaz formiranja višestrukih linija istovremeno. ....	47
Slika 58. usporedba analize rezultata mjerenja a) Segment dijagrama sila u vremenu ispitivanja i b) Segment promjene temperature i ostvarene deformacije dobivenih DIC analizom i termografijom. ....	48

**Popis tablica:**

Tablica 1. Aluminijske legure za gnječenje prema normi EN 573-3 [9] .....	3
Tablica 2. Aluminijske legure za lijevanje prema normi EN 1706 [9] .....	4
Tablica 3. Prikaz nekih karakteristika PLC linija za neke legure aluminija [4].....	17

## 1. UVOD

Posljednjih godina aluminij i aluminijske legure su postali nezamjenjiv materijal u industriji proizvodnje automobila, industriji zrakoplova, te u mnogim drugim granama industrije. Aluminij i aluminijske legure imaju vrlo dobru čvrstoću, malu gustoću, dobru toplinsku vodljivost, dobru električnu vodljivost te jako dobru otpornost na koroziju [1].

Neke aluminijske legure i vrste čelika pokazuju ponavljajuće diskontinuirano popuštanje, takozvani Portevin-Le Chatelierov efekt pri određenim brzinama deformacije i temperaturama što ograničava primjenu legura. Lokalizirana deformacija povezana sa PLC efektom u industriji uzrokuje razne probleme tijekom proizvodnje, a na površini proizvoda se pojavljuju greške koje nije moguće kasnije adekvatno ukloniti, te predstavljaju vizualni nedostatak na proizvodima. PLC efekt se pripisuje dinamičkom očvršćivanju deformacijom gdje atomi otopljenog elementa stupaju u interakciju s pokretnim dislokacijama tijekom deformacije [2].

PLC efekt je prvi put uočen i zabilježen početkom 19. stoljeća kada su Felix Savart i Antoine Masson na uzorcima od mjedi, željeza, čelika, bakra i cinka uočili pojavu nestabilnog plastičnog toka. Kasnije su Albert Portevin i Francois Le Chatelier proučavali pojavu nazubljenja na uzorku duraluminija pri sobnoj temperaturi i pri različitim brzinama deformacije [3].

Najvažniji čimbenici za pojavu PLC efekta su temperatura i brzina deformacije. Kod statičnog vlačnog ispitivanja pri konstantnoj brzini deformacije, dolazi do plastične nestabilnosti koja se na dijagramima naprezanje-istezanje očituju kao nazubljenje s padom iznosa naprezanja oko određene amplitude. Sama pojava PLC efekta se uočava kao lokalizirana deformacija u presjeku uzorka, te se manifestira kao više linija po samoj površini gotovog proizvoda. U posljednje vrijeme provedena su značajna istraživanja ovih pojava. Istraživanjima je uočeno kako postoji nekoliko tipova ovih linija, a one se najčešće dijele na linije tipa A, linije tipa B i linije tipa C, što će se definirati u nastavku. Osim tri navedena tipa linija postoje i križne linije, te linije tipa D i linije tipa E koje su zabilježene samo kod nekih legura [4].

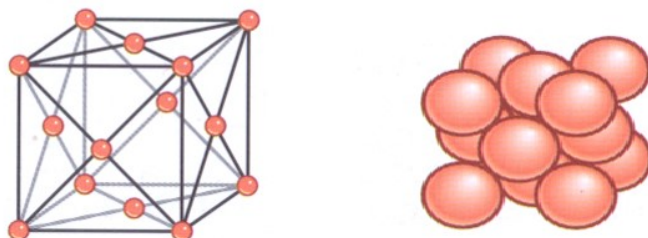
Istraživanja ovih pojava su olakšana novim metodama ispitivanja materijala, a najčešće korištene metode su termografija i digitalna korelacija slike (DIC – Digital Image Corelation). Naime, spomenute metode prvenstveno omogućavaju lakšu vizualizaciju PLC pojave, uz mogućnost mjerenja iznosa lokalizirane deformacije, određivanje njene brzine, temperaturnih promjena i mnogih drugih vrijednosti. Tim istraživanjima pokušava se pojasniti ponašanje ove pojave, a uz strukturalna ispitivanja odrediti uzrok istih.

Dosadašnja istraživanja ne daju jasnu sliku o mehanizmima koji uzrokuju ovu pojavu. Kako su različiti materijali koji se istražuju tako su i različita razmišljanja pojedinih istraživača o mehanizmima nastanka i propagacije lokaliziranih deformacija. Stoga je cilj ovog rada istražiti karakteristike pojave Portevin-Le Chatelier efekta kod AlMg legura tijekom hladne deformacije.

## 2. TEORIJSKI DIO

### 2.1. Aluminij

Aluminij ima gustoću oko  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , što je otprilike trećina gustoće čelika. Atomi aluminija tvore plošno centriranu kubičnu rešetku, slika 1. Točka taljenja aluminija je  $660 \text{ }^\circ\text{C}$ . Aluminij posjeduje odlična antikorozijska svojstva, te se u prisustvu kisika iz zraka oblaže tankim slojem aluminijevih oksida. Za razliku od željezne hrđe koja se ljušti, sloj aluminijevog oksida se ne ljušti te tako štiti aluminij od oksidacije. Površina aluminija je vrlo reflektirajuća, te se vidljiva svjetlost, toplina i elektromagnetski valovi učinkovito reflektiraju. Aluminij posjeduje odličnu toplinsku i električnu vodljivost, te se koristi za izradu visokonaponskih kablova s aluminijsko čeličnom jezgrom. Zbog svoje dobre toplinske vodljivosti koristi se i za izradu izmjenjivača topline, isparivača, radijatora i dr. Aluminij je nemagnetičan, netoksičan, te ima atraktivan izgled zbog kojega ga se često koristi i u dekoracijske svrhe, a može se lako oblikovati u bilo koji oblik. Mala težina u kombinaciji sa visokom čvrstoćom nekih aluminijskih legura, čine ga idealnim za industriju vozila, zrakoplova, brodova, itd [1,5,6].



Slika 1. Prikaz plošno centrirane kubične rešetke aluminija [7]

Aluminij u čistom obliku nije u upotrebi za konstrukcijske svrhe, te su zbog toga razvijene brojne legure aluminija. Legure aluminija se mogu podijeliti na legure za kovanje i legure za lijevanje, a one se dalje mogu podijeliti u ovisnosti o načinu očvršćivanja na toplinski očvrstive legure i toplinski neočvrstive legure, a njihov prikaz je dan u tablici 1 i tablici 2. Aluminij i aluminijske legure se mogu lijevati svim tehnologijama u ljevaonicama. Aluminijske legure se lako može valjati u limove, trake i folije do željene debljine pa i tanke nekoliko nanometara. Također se mogu i izvlačiti žice. Aluminij se može ekstrudirati u razne profile i oblike. Pravilnim legiranjem i obradom, aluminij može biti otporan na koroziju vode, soli i niz drugih kemijskih tvari. [1,5]. Na slici 2 je dan prikaz aluminijske folije.



Slika 2. Prikaz aluminijske folije [8]

Tablica 1. Aluminijske legure za gnječenje prema normi EN 573-3 [9]

Oznaka	Glavni legirajući element	Svojstva	Primjena	Način očvršćivanja
1xxx	Aluminij	Lako oblikovanje, otpornost na koroziju i električna vodljivost	Aluminijske folije, dijelovi vozila, vodiči	Toplinski neočvrstive
2xxx	Bakar	Visoka čvrstoća	Dijelovi zrakoplova i automobila	Toplinski očvrstive
3xxx	Mangan	Lako oblikovanje i otpornost na koroziju	Kuhinjsko posuđe, kemijska oprema, za izradu krovova i za izradu limenki	Toplinski neočvrstive
4xxx	Silicij	Dobro tečenje, lako spajanje	Kovanje i zavarivanje	Toplinski neočvrstive
5xxx	Magnezij	Otpornost na koroziju, žilavost i zavarljivost	Za građevinu i konstrukcije, za kriogenske tankove i za upotrebu u moru	Toplinski neočvrstive
6xxx	Magnezij i silicij	Otpornost na koroziju, lako oblikovanje, dobra zavarljivost	Za ekstruziju, za konstrukcije, za krovove	Toplinski očvrstive
7xxx	Cink	Visoka čvrstoća	Za dijelove zrakoplova	Toplinski očvrstive
8xxx	Ostali elementi	Visoka provodljivost, dobra čvrstoća	Za provodnike	Toplinski očvrstive
9xxx	Nedodijeljeno			Toplinski očvrstive

Tablica 2. Aluminijske legure za lijevanje prema normi EN 1706 [9]

Oznaka	Glavni legirajući element	Svojstva	Primjena	Način očvršćivanja
1xx.x	Aluminij	Otpornost na koroziju, dobro zavarivanje	Obloge za legure sklone koroziji	Toplinski neočvrstive
2xx.x	Bakar	Dobra čvrstoća, dobra žilavost	Za svemirsku industriju, za glave cilindara u auto industriji	Toplinski očvrstive
3xx.x	Silicij i bakar ili magnezij	Visoka čvrstoća, visoka žilavost, dobra zavarljivost	Za tlačno lijevanje,	Toplinski očvrstive
4xx.x	Silicij	Dobra za lijevanje, dobra zavarljivost	Za odljevke tankih stijenki	Toplinski neočvrstive
5xx.x	Magnezij	Odlična otpornost na koroziju, dobra obradivost i kvaliteta površine	Za izradu prozora i vrata, za dijelove izložene slanoj vodi	Toplinski neočvrstive
6xx.x	Nedodijeljeno			
7xx.x	Cink	Dobra obradivost, dobar izgled	Za namještaj, za vrtni alat, te za opremu za rudarenje	Toplinski očvrstive
8xx.x	Kositar	Odlična obradivost	Za ležajeve	Toplinski očvrstive
9xx.x	Ostali elementi			Toplinski očvrstive

### 2.1.1. Legure aluminija i magnezija

Legure aluminija i magnezija su binarne legure s vrlo dobrom čvrstoćom i žilavosti, a njihova najvažnija karakteristika je otpornost na koroziju. Zbog te karakteristike one se naširoko koriste za upotrebu u prehrambenoj industriji. Legure aluminija i magnezija posjeduju dobru zavarljivost, obradivost i atraktivan izgled, a često se koriste u dekorativne svrhe. Magnezij u legurama aluminija povećava sklonost oksidaciji, a u rastaljenom stanju gubici magnezija mogu biti značajni. Legure aluminija i magnezija sa sadržajem magnezija većim od 7 % mogu se toplinski obrađivati, a toplinska obrada se provodi kako bi se stabilizirala svojstva koja bi se inače mogla promijeniti u nekim slučajevima kroz dulji vremenski period. Magnezij je jedan od dva elementa s najvećom topljivošću u krutom aluminiju, drugi element je cink. Magnezij u legurama aluminija i magnezija smanjuje katodnu reakciju, no što je viši sadržaj magnezija, legura je osjetljivija na intergranularnu koroziju [1,5].

Magnezij je glavni legirajući element u 5xxx seriji legura za kovanje. Legure iz ove serije posjeduju dobra svojstva zavarljivosti. U seriji legura za kovanje 6xxx, magnezij je glavni legirajući element zajedno sa silicijem. Legure iz serije 6xxx se daju lako oblikovati, imaju dobru zavarljivost, obradivost i otpornost na koroziju uz srednju čvrstoću. Maksimalna topljivost magnezija u čvrstom aluminiju je 17,4 %, ali sadržaj magnezija u današnjim legurama za kovanje ne prelazi 5,5 %. Legure za lijevanje koje sadrže do 5 % magnezija su stabilne pri



normalnim uvjetima upotrebe. Dodatak magnezija poboljšava čvrstoću aluminiju bez da se snizi duktilnost [6,9,10].

U legurama za lijevanje, magnezij je glavni legirajući element u seriji 5xx.x. Serija aluminijskih legura za lijevanje 5xx.x ima visoku otpornost na koroziju. Legure aluminijske i magnezijске posjeduju dobru obradivost te atraktivan izgled kada se anodiziraju. Magnezij se nalazi i u seriji legura 7xx.x gdje su glavni elementi aluminij, cink i magnezij. Serija legura 7xx.x posjeduje dobru kvalitetu površine, dobru korozijsku otpornost i sposobnost razvijanja visoke čvrstoće kroz očvršćivanje bez toplinske obrade [5,6,10]

## **2.2. Mehanizmi očvršćivanja Al legura**

Čisti aluminij je mekan i ima malu čvrstoću, te su zbog toga razvijene brojne legure koje imaju bolja mehanička svojstva od čistog aluminijskog. Čvrstoća aluminijskih legura se može modificirati kombinacijom hladne deformacije, legiranja i toplinske obrade. Sve legure aluminijske mogu očvršćivati postupcima hladne deformacije u procesima kao što su valjanje i izvlačenje žice. Kojim mehanizmom će legura aluminijska očvršćivati ovisi o legiranim elementima u leguri [11,12].

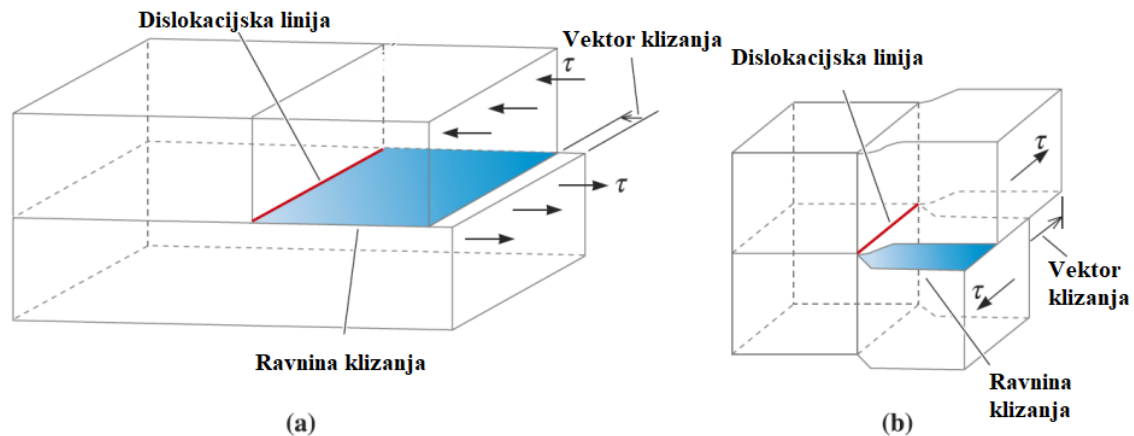
Očvršćivanje deformacijom uključuje promjenu dimenzija materijala, a tijekom deformacije dolazi do porasta čvrstoće zbog povećanja broja dislokacija u metalu. Dislokacije se gibaju unutar metala kada je metal izložen velikom naprezanju. Očvršćivanje deformacijom u hladnom stanju se može provoditi postupcima kao što su kovanje, valjanje, vučenje, prešanje i slično. Materijal koji je deformacijski očvrstnut nosi oznaku H [12,13].

Legure aluminijske mogu se očvršćivati legiranjem na način da se određeni legirajući elementi miješaju s aluminijem u rastaljenom stanju pri proizvodnji. Prisutnost tih legirajućih elemenata utječe na dislokacije tako da koče kretanje dislokacija, a time povisuju naprezanje potrebno za gibanje dislokacija što rezultira porastom čvrstoće materijala. Neki od elemenata koji se dodaju kako bi aluminijske legure očvrstnule su magnezij i mangan. Atomi magnezija i mangana su pritom prepreke gibanju dislokacija kroz aluminij. Topljivost magnezija je bolja od topljivosti mangana u čvrstom aluminiju, te je zbog toga moguće bolje očvršćivanje legiranjem kod serije 5xxx legura nego kod serije 3xxx legura [12].

Kod očvršćivanja precipitacijom, čestice manje od 0,001 mm u promjeru se formiraju unutar metala. Te čestice se nazivaju precipitati, a sastoje se od spojeva aluminijskih i legirajućih elemenata ili samo od spojeva legirajućih elemenata. Precipitati se formiraju tijekom procesa deformacije i/ili procesa toplinske obrade. Očvršćivanje precipitacijom ovisi o korištenoj aluminijskoj leguri i temperaturi toplinske obrade, te stupnju deformacije. Samo neke aluminijske legure mogu očvršćivati precipitacijom. Legure serije 2xxx, 6xxx i 7xxx mogu očvršćivati precipitacijom tako da tvore precipitate Al-Cu (2xxx), Mg-Si (6xxx) i Al-Zn-Mg-Cu (7xxx). Legure serije 1xxx, 3xxx, 4xxx i 5xxx ne mogu očvrstnuti precipitacijom [12,13].

### 2.2.1. Dislokacije

Kod deformacije dolazi do kidanja i obnavljanja atomskih veza, a pri deformaciji kristala pod djelovanjem vanjske sile na kristalu se pojavljuje granica između deformiranog dijela kristala i nedeformiranog dijela kristala, te se ta granica naziva dislokacijska linija. [11]. Dislokacijska linija je prikazana na slici 3.



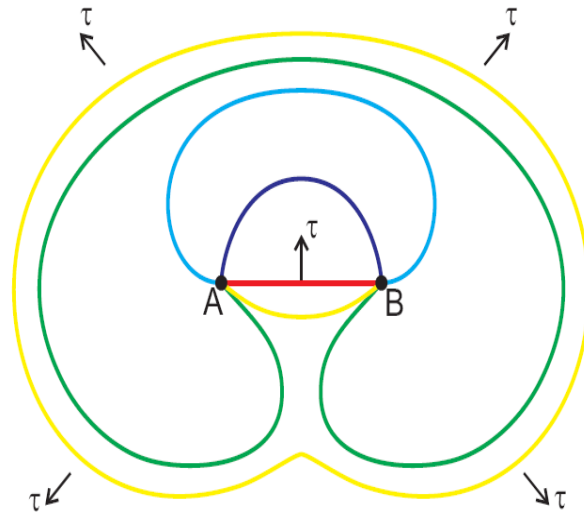
Slika 3. Prikaz dislokacijske linije, ravnine klizanja i vektora klizanja za a) rubnu dislokaciju i za b) zavojnu dislokaciju [14]

Na slici 3 dislokacijska linija prolazi između deformiranog i nedeformiranog dijela kristala, gdje je najveća distorzija u odnosu na savršenu rešetku. Kod rubne dislokacije (a) je Burgersov vektor okomit na dislokacijsku liniju, a kod zavojne dislokacije (b) Burgersov vektor je paralelan u odnosu na dislokacijsku liniju [14].

Dislokacije su linijske greške, a utjecaj dislokacija na mehanička svojstva materijala je velik. Kod plastične deformacije, gibanje dislokacija se provodi kroz kristalnu rešetku, a pri maloj pokretljivosti dislokacija smanjuje se mogućnost plastične deformacije. Dislokacija olakšava plastičnu deformaciju zbog toga što su atomske veze već rastegnute i stisnute, a klizanje kristala se ne mora pojaviti istovremeno kod svih atoma u ravnini klizanja, te se dislokacija neće vratiti na početnu točku kada dođe do prestanka djelovanja sile. Do smanjenja plastičnosti dolazi zbog precipitata i povećanja gustoće dislokacija što uzrokuje smanjenu pokretljivost dislokacija te se na taj način odvija očvršćivanje legura [11,15].

Dislokacija može biti pozitivna i negativna, a razlika je u tome što pozitivna dislokacija ima u jednom redu više atoma od savršene kristalne rešetke, dok negativna dislokacija ima u jednom redu manje atoma od savršene kristalne rešetke. Dislokacije se mogu podijeliti na rubne dislokacije i zavojne dislokacije. Rubna dislokacija se naziva još i Taylor-ova dislokacija, te se giba okomito na svoju dužinu ili paralelno smjeru klizanja. Rubna dislokacija je opisana sa dva vektora, prvi vektor je linijski vektor koji je usmjeren u pravcu dislokacijske linije, a drugi vektor je Burgers-ov vektor. Zavojna dislokacija se još naziva i Burgers-ova dislokacija, te se kod zavojne dislokacije, dislokacija giba okomito smjeru klizanja. Zavojna dislokacija se također može definirati sa linijskim vektorom i Burgers-ovim vektorom. Zavojna dislokacija može klizati po svim ravninama, dok rubna dislokacija može klizati samo po ravninama u kojima se nalazi dislokacijska linija. Glavni mehanizam nastanka dislokacija je nakupljanje praznih mjesta, a on se još naziva i mehanizam Franka i Reada, prikazanog na slici 4. Pri

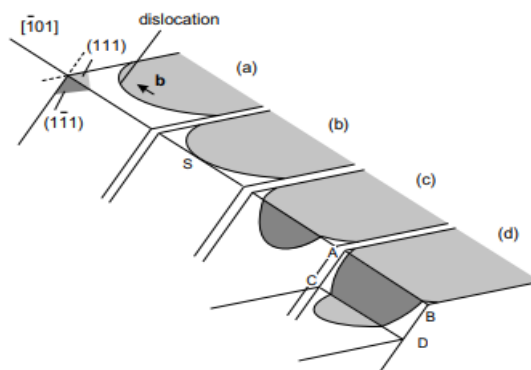
smičnom naprezanju nastala dislokacija dovodi do stvaranja većeg broja novih dislokacija [11,15].



Slika 4. Prikaz mehanizma Franka i Reada [16]

Na slici 4 je dan prikaz mehanizma Franka i Reada, prema kojem je dislokacija zakačena na dvije točke [16].

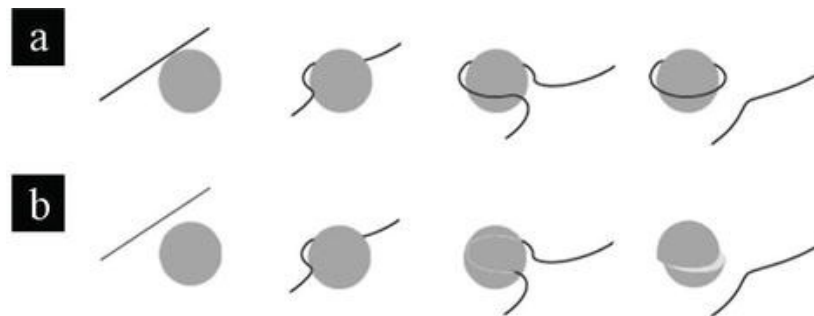
Osim mehanizma Frank-a i Read-a postoji i složeniji mehanizam povećanja broja dislokacija, a to je mehanizam višestrukog poprečnog klizanja. Višestruko poprečno klizanje se pojavljuje kod zavojnih dislokacija, te se kod višestrukog poprečnog klizanja klizanje odvija na više ravnina klizanja. Do višestrukog poprečnog klizanja dolazi kada se dislokacija kreće s jedne ravnine klizanja na drugu, te nastavlja gibanje paralelno na prvu ravninu klizanja. Višestruko poprečno klizanje je prikazano na slici 5 [11,17].



Slika 5. Prikaz mehanizma višestrukog poprečnog klizanja [15]

Ako se u strukturi nalaze greške kao što su precipitati, doći će do interakcije precipitata i dislokacija. Odvijanje interakcije precipitata i dislokacija je moguće pomoću dva mehanizma. Prvi način interakcije precipitata i dislokacija je da dislokacija presijeca precipitate, te nastavlja gibanje što je prikazano na slici 6 b). Drugi način je da dislokacija zaobiđe precipitate pritom stvarajući dislokacijske petlje oko precipitata što je prikazano na slici 6 a). Prvi način se još naziva i Orowan-ov mehanizam, pri kojemu je dislokaciji za stvaranje petlje i nastavak gibanja

potrebno naprezanje koje se još naziva i Orowan-ovo naprezanje pri čemu dolazi do očvršćivanja materijala. Ako precipitati nemaju dovoljnu čvrstoću kako bi izdržali gibanje dislokacija dok se ne pokrene Orowan-ov mehanizam naprezanja, doći će do presijecanja precipitata, što je prikazano na slici 6 b). Očvršćivanje raste sa povećanjem volumnog udjela precipitata.[11,18].



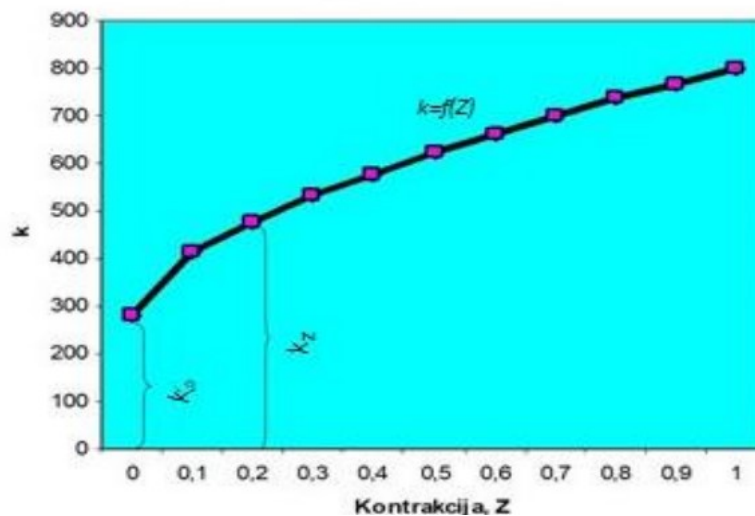
Slika 6. Prikaz interakcije precipitata i dislokacija, a) zaobilaznja dislokacija i b) presijecanja dislokacija [19]

Na slici 6 a) dislokacija nailazi na precipitate te ih zaobilazi i oko njih stvara dislokacijske petlje, a na slici 6 b) dislokacija nailazi na prepreku te ju presijeca i nastavlja kretanje [19].

### 2.2.2. Hladna plastična deformacija

Plastična deformacija se može podijeliti ovisno o temperaturi na kojoj se provodi na toplu plastičnu deformaciju i hladnu plastičnu deformaciju. Deformacija se može nazivati hladnom plastičnom deformacijom ako se deformacija provodi ispod temperature rekristalizacije. Kod hladne plastične deformacije, veći dio mehaničke energije korištene za hladnu deformaciju transformira se u unutarnju energiju deformiranog materijala, a manji dio se pohranjuje kao energija naprezanja. Pri hladnoj plastičnoj deformaciji dolazi do povećanja broja dislokacija zbog toga što pri hladnoj plastičnoj deformaciji ne dolazi do oporavka i rekristalizacije [11,20].

Hladna plastična deformacija se koristi kako bi se postigla bolja mehanička svojstva te radi postizanja bolje završne kvalitete površine dijelova. Prilikom procesa hladne deformacije dolazi do povećanja vlačne čvrstoće, granice elastičnosti i tvrdoće, a smanjuju se poprečni presjek i duktilnost. Prilikom hladne plastične deformacije dolazi do deformacijskog očvršćivanja metala, te je to jedan od osnovnih načina očvršćivanja metala. Povećanjem stupnja deformacije, doći će do većeg stupnja očvršćivanja. Ovisnost promjene specifičnog deformacijskog otpora o stupnju deformacije grafički se prikazuje krivuljama očvršćivanja. Krivulje očvršćivanja se dijele na tri reda krivulja očvršćivanja: krivulje očvršćivanja prvog reda kod kojih je deformacija izražena produljenjem, krivulje drugog reda kod kojih se deformacija izražava kontrakcijom te krivulje trećeg reda kod kojih se deformacija izražava logaritamski. Na slici 7 je dan prikaz krivulje očvršćivanja drugog reda [11,20,21].



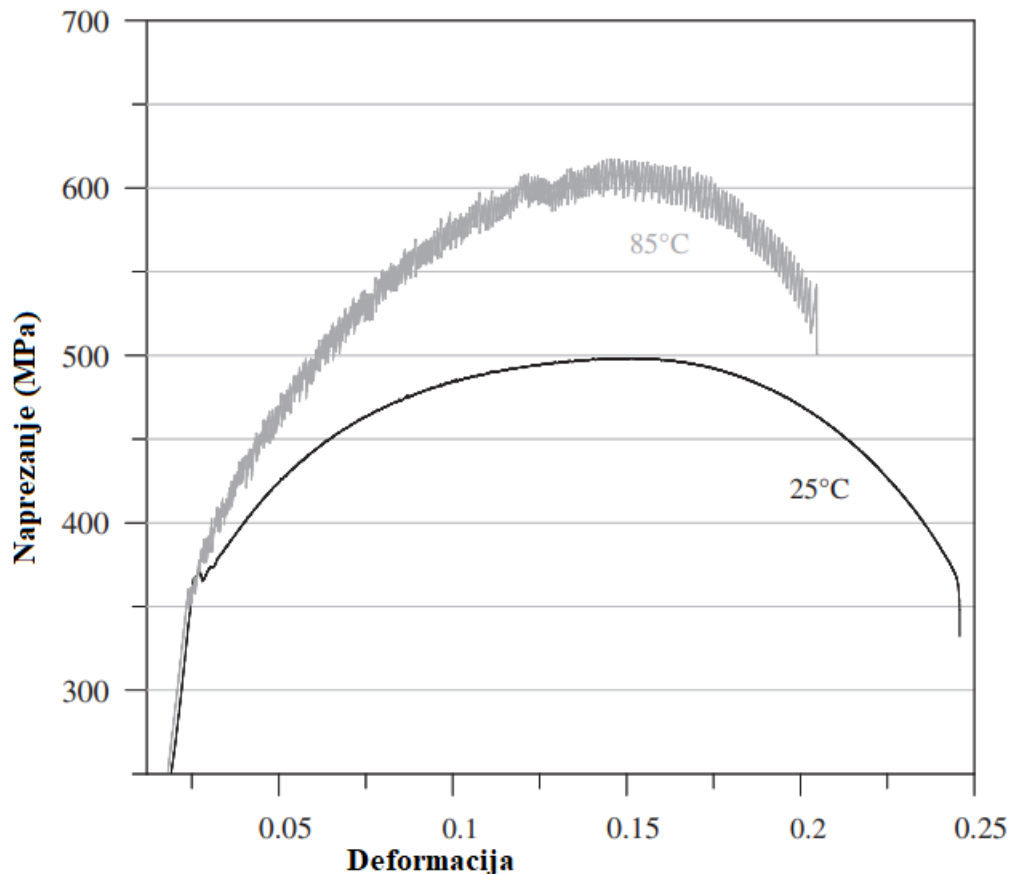
Slika 7. Prikaz krivulje očvršćivanja drugog reda [11]

Određivanje krivulja očvršćivanja se vrši statičko vlačnim pokusom pri konstantnoj deformaciji. Pri porastu temperature dolazi i do rasta brzine očvršćivanja. U slučaju prisutnosti precipitata i legirajućih elemenata dolazi do promjena u krivuljama očvršćivanja na način da dolazi do porasta čvrstoće materijala te porasta sile. Pri hladnoj deformaciji nema oporavka i rekristalizacije pa je utjecaj legirajućih elemenata jasno uočljiv i na krivuljama naprezanje-istezanje. Pri hladnoj plastičnoj deformaciji plastičnost se smanjuje, a deformacijski otpor raste. Prilikom zagrijavanja hladno deformiranog metala, u metalu su moguća odvijanja dva procesa, statička rekristalizacija i statičko oporavljanje. Prilikom oporavka hladno deformiranog metala mijenjaju se svojstva, smanjuje se naprezanje te dolazi do preraspodijele dislokacija. Pri višim temperaturama od temperature oporavka odvija se rekristalizacija. Prilikom rekristalizacije zagrijavanjem se smanjuje zrno. Kod hladne plastične deformacije AlMg legura često se mogu uočiti netipične krivulje očvršćivanja, a to u istraživanjima povezuju s Portevin-Le Chatelier-ovim efektom [11,20,21].

### 2.3. Portevin-Le Chatelier-ov efekt

Kod nekih legura bakra, aluminija te u nekim čelicima pri određenim brzinama deformacije i temperaturama dolazi do pojave nestabilnosti u obliku nazubljene krivulje na dijagramu naprezanja s karakterističnim padovima i porastima naprezanja. Tu nestabilnost su prvi proučavali A. Portevin i F. Le Chatelier. Iako se ovaj efekt naziva Portevin-Le Chatelier-ov prema A. Portevin-u i F. Le Chatelier-u koji su objavili prvi rad o trzajućem protoku pri konstantnoj brzini deformacije, prva opažanja o plastičnoj nestabilnosti su napravljena od strane F. Savarta i A. Masson-a te se prema njima takav trzajući protok se još naziva i Savart-Massonov efekt [22,23].

Pri statičkom vlačnom ispitivanju gdje je brzina deformacije konstantna, dolazi do plastične nestabilnosti koja se očituje na dijagramu naprezanja kao nazubljenje s padom naprezanja. Ta nazubljenja se proučavaju već dugi niz godina raznim metodama. Padovi naprezanja na krivulji se tumače konceptom negativne osjetljivosti na brzinu deformacije u određenom intervalu brzine, te se na krivulji naprezanje-deformacija ta negativna osjetljivost na brzinu deformacije očituje kao nazubljeni tok. Na slici 8 je dan prikaz usporedbe između nazubljene krivulje i nenazubljene krivulje [24].



Slika 8. Usporedba nazubljene krivulje (gore) i nenazubljene linije (dolje) [4]

Lokalizirana deformacija povezana s PLC efektom dovodi do pojave kozmetičkih i strukturalnih problema na gotovim proizvodima. PLC efekt povećava naprezanje, krhkost i vlačnu čvrstoću, a smanjuje duktilnost metala i otpornost na lom. Također može dovesti do nepopravljive hrapavosti površine. Za istraživanje PLC efekta koriste se vlačna ispitivanja te optičke, akustične, termografske, magnetske, elektromagnetske i elektrokemijske tehnike [22,25].

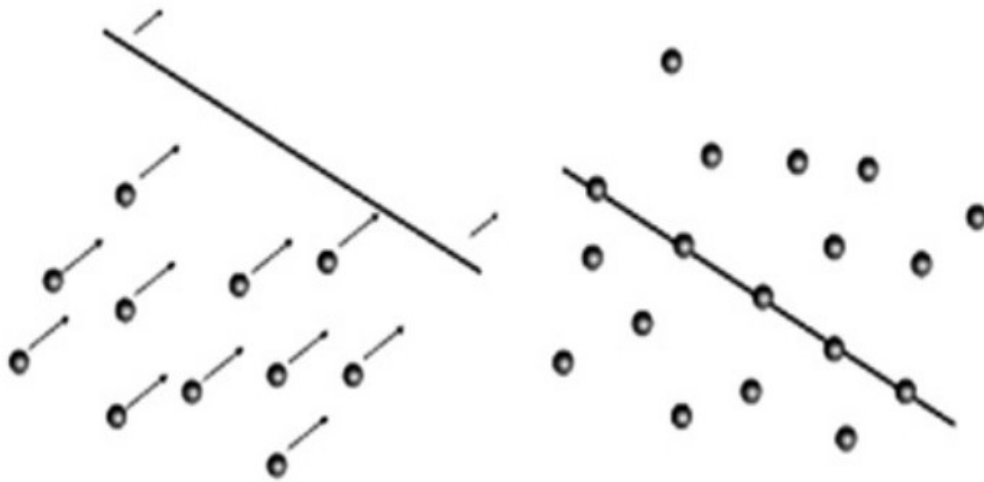
Najvažniji vanjski čimbenici za pojavu PLC efekta su temperatura i brzina deformacije, te se ovaj efekt može pojaviti samo u određenom području brzine deformacije. Na pojavu PLC efekta također utječu i koncentracija otopljene tvari, koeficijent difuzije, način difuzije, sadržaj precipitata, kvaliteta površine uzorka, sastav legure, tip kristala, gustoća otopljene tvari, gustoća dislokacija i veličina zrna. Međutim, svi navedeni faktori ne moraju nužno imati značajan utjecaj, a istraživanjima je dokazano da kod nekih legura bakra s dodatkom aluminija granica zrna nema nikakvog utjecaja na svojstva deformacijske linije. Zbog brojnih utjecajnih faktora PLC se smatra ogromnim kompleksnim sustavom [4,26].

Do sada su istraživane karakteristike PLC efekta u aluminijskim legurama [4], prostorno vremenska dinamika PLC efekta [27], karakteristike PLC linija [28], nazubljenje krivulje dijagrama naprezanje-deformacija [29], te mnoge druge karakteristike PLC efekta [25]. Istraživana je i povezanost dinamičkog očvršćivanja deformacijom kao mogući mehanizam nastanka PLC efekta [30], te kinematičke karakteristike PLC linija [31]. Većina istraživanja koristi metodu statičkog vlačnog pokusa, metodu termografije i metodu digitalne korelacije slike (DIC). No neka istraživanja su koristila i metodu akustičnih emisija [32]. Do sada je bilo

nekoliko pokušaja numeričkog modeliranja PLC efekta [33-37] no predloženi modeli opisuju samo istraživane slučajeve, te ne mogu objasniti druge slučajeve.

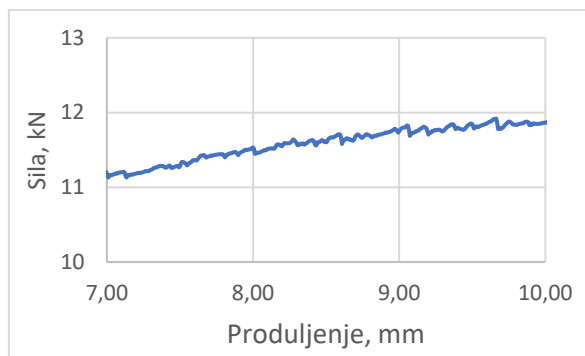
### 2.3.1. Mehanizam nastajanja PLC efekta

Najprihvaćenije objašnjenje nastanka PLC efekta se zasniva na interakciji između pokretnih dislokacija i difuznih atoma otopljenog elementa, a koje se u literaturi još može pronaći i pod imenom dinamičko očvršćivanje deformacijom. Razumijevanje plastične deformacije se temelji na dislokacijama. Kako plastični tok materijala objašnjavamo preko teorije dislokacija, može se zaključiti da ukoliko nema prepreka kretanju dislokacija, plastični tok je stabilan. No u slučaju prisutnosti drugih dislokacija, precipitata ili uključaka, dislokacije se otežano kreću. Tada je plastično tečenje nestabilno. Pri visokim stupnjevima deformacije, uslijed očvršćivanja, deformacija postaje sve teža i teža. Do nestabilnog plastičnog toka može doći zbog zapetljavanja dislokacija u druge dislokacije. Pri zapetljavanju dislokacija dolazi do njihovog nagomilavanja što može dovesti do blokiranja stabilnog plastičnog toka sve dok se ne stvori dovoljna deformacija koja će ih savladati. Do pojave nestabilnog plastičnog tečenja može doći i zbog interakcije pokretnih dislokacija i otopljenih atoma. Zbog interakcije pokretnih dislokacija i otopljenih atoma dolazi do ometanja kretanja dislokacija što je prikazano na slici 9 [22,26].



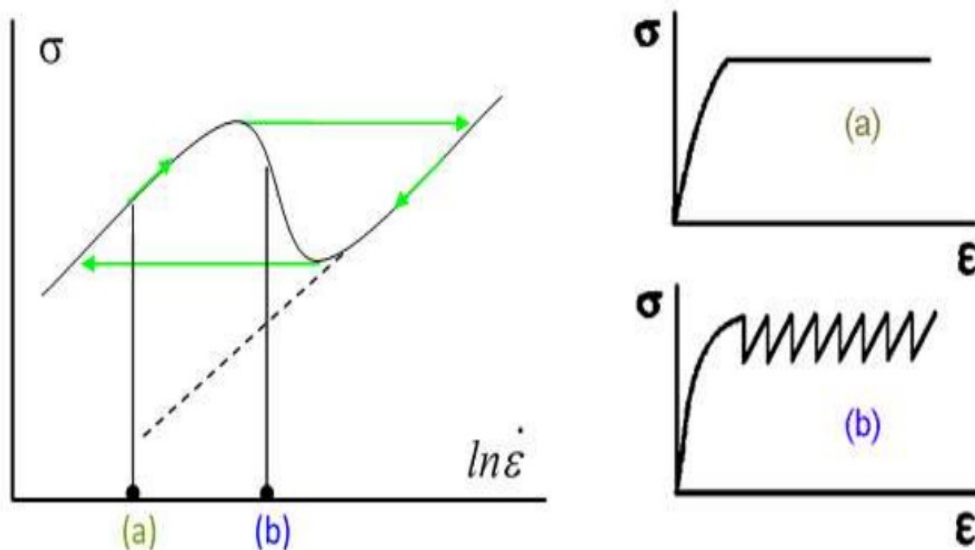
Slika 9. Prikaz interakcije otopljenih elemenata i pokretnih dislokacija [38]

Pokretne dislokacije koje su nositelji plastične deformacije se privremeno zaustavljaju na oblaku otopljenih elemenata. Atomi otopljene tvari i pokretne dislokacije dolaze u interakciju, te otežavaju njihovo kretanje. Dislokacije savladavaju prepreke te se visokim brzinama kreću do iduće prepreke. Takvo stalno kretanje te zaustavljanje dislokacija se na dijagramu naprezanja očituje kao nazubljena linija, što je prikazano na slici 10 [23,26].



Slika 10. Prikaz nazubljene linije za leguru AlMg4,5

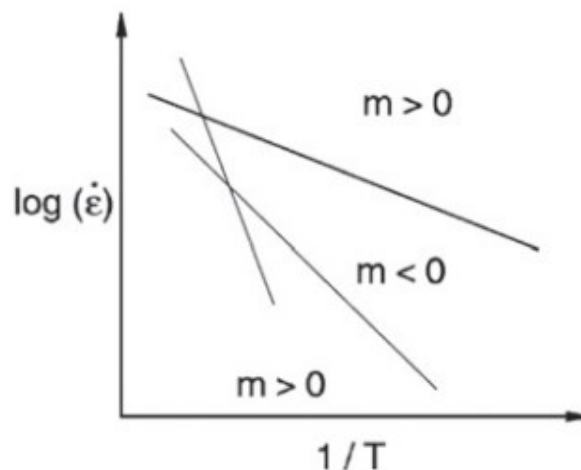
Pokretljivost otopljenih elemenata unosi negativan doprinos ukupnoj osjetljivosti na brzinu deformacije te se taj doprinos povećava sa povećanjem deformacije. Kada ukupna osjetljivost na brzinu deformacije postane negativna, plastično tečenje postaje nestabilno te se pojavljuju karakteristike PLC efekta. Pri konstantnoj temperaturi odnos između naprezanja i brzine deformacije na danoj razini deformacije može se opisati krivuljom u obliku slova N, prikazane na slici 11 [25,26,28].



Slika 11. Prikaz N krivulje (lijevo) s pozitivnim područjem osjetljivosti na brzinu deformacije (a) i s negativnim područjem osjetljivosti na brzinu deformacije (b), s naznačenim pripadajućim krivuljama na dijagramu naprezanje-brzina deformacije [28]

U području dijagrama gdje dolazi do pada naprezanja, pri srednjim brzinama deformacije, gibanje dislokacija i difuzija otopljenog elementa su usporedivih vremenskih skala te će se u tom dijelu dijagrama promatrati negativna osjetljivost na brzinu deformacije. Izvan područja dijagrama gdje dolazi do pada naprezanja nalazi se pozitivna osjetljivost na brzinu deformacije, te se na tom dijelu dijagrama nalaze materijali koji ne pokazuju PLC efekt što je prikazano na slici 11. Slika 12 daje prikaz krivulje ovisnosti brzine deformacije o temperaturi gdje se PLC efekt pojavljuje u područjima gdje je osjetljivost na brzinu deformacije manja od nule ( $m < 0$ ) [2,28].





Slika 12. Prikaz krivulje ovisnosti brzine deformacije izražene logaritamski o temperaturi, PLC efekt se pojavljuje u području gdje je  $m < 0$  [22]

Iako su stariji modeli pretpostavljali da slobodna mjesta ne doprinose PLC efektu u intersticijskim legurama [39,40], najnovija istraživanja koja se temelje na mehanizmu koji uključuje difuziju izazvanu temperaturom, pokazuju suprotno [41].

Pored navedenih mehanizama postoje mnoge druge interpretacije mehanizama nastajanja PLC efekta u raznim materijalima, a neke osnovne pretpostavke korištene za tumačenje jednog slučaja pokazale su se kao nedovoljne za objašnjenje nekog drugog slučaja. U većini slučajeva predloženi modeli za PLC efekt su povezani samo sa određenim, proučavanim uzorkom. Većina teorijskih modela ne daje objašnjenje za točnu prirodu promatranih PLC pojava [22,28].

## 2.4. PLC linije

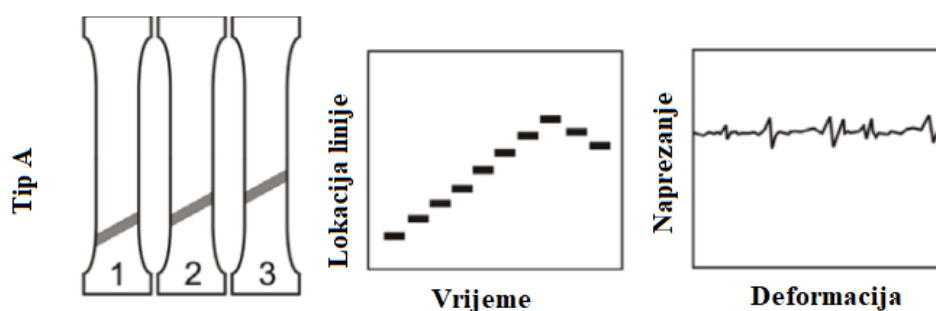
Najznačajnija karakteristika PLC efekta je lokalizacija deformacije u presjeku napregnutog uzorka te gibanje lokalizirane deformacije duž uzorka. Lokalizacija deformacije se pokazuje kao linija debljine nekoliko milimetara, te se u uzorku kreće na razne načine. Kut linije može varirati na horizontalnoj osi. Linije mogu promijeniti nagib no samo neposredno prije kraja uzorka. Istraživanja su pokazala da postoji nekoliko tipova takvih PLC linija te da se pri promjeni brzine deformacije i temperature može dogoditi pretvorba iz jednog tipa linije u drugu. Svaki tip takvih linija ima definirani nazubljeni oblik u krivulji napreznja, a razlikuju se prema prostorno-vremenskom uređenju deformacijskih linija. U različitim režimima deformacije javljaju se različiti tipovi nazubljenja [2,4,25].

Ti tipovi linija se označavaju s A, B i C. Linije tipa C se pojavljuju nasumično u uzorku, linije tipa B se šire isprekidano, dok se linije tipa A šire kontinuirano. PLC linije su karakterizirane nagibom linije, širinom, brzinom širenja te dimenzijama. Širina PLC linija ovisi o debljini uzorka, deformaciji, brzini deformacije i vrsti linija. U dosadašnjim istraživanjima širine linija su se kretale od polovice debljine uzorka do dvostruke debljine uzorka. Pri povećanju napreznja dolazi do smanjenja brzine linija, no općenito se prihvaća da su brzine linija konstantne, a moguća odstupanja se pripisuju eksperimentalnom šumu. Linije PLC efekta su prijelazne te se različiti tipovi linija ne pojavljuju zajedno osim pri kritičnim temperaturama i

brzinama deformacije, a takve linije se onda nazivaju prijelazne linije. Istraživanja su pokazala da kada je prisutan jedan tip linije, drugi tipovi nestaju [4,25,26].

### 2.4.1. PLC linije tipa A

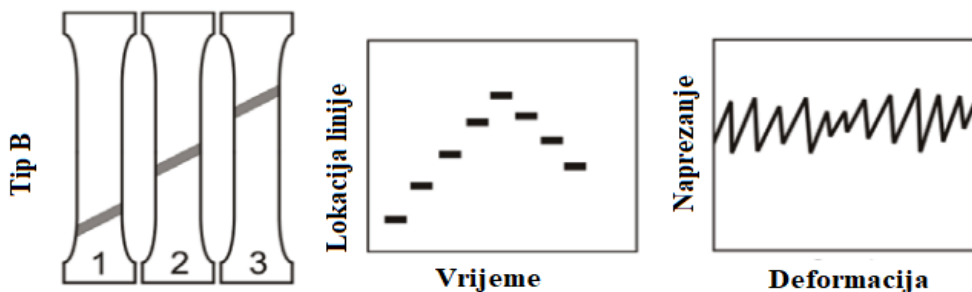
Linije tipa A se javljaju pri većim stupnjevima deformacije i nižim temperaturama. One su najnepravilnije s malim padom napreznja na krivulji sila-produljenje. Istraživanja pokazuju da se linije tipa A mogu podijeliti u dva podtipa, a to su A1 i A2, a razlikuju se u tome što kod linija tipa A1 dolazi do iznenadnog pada napreznja, a kod tipa A2 do postupnog pada napreznja. Linije tipa A se šire kontinuirano te nalikuju uzdužnom valu. Na slici 13 je dan shematski prikaz kretanja, orijentacije i nazubljene krivulje za PLC liniju tipa A [4,25].



Slika 13. Shematski prikaz kretanja, orijentacije i nazubljene krivulje za linije tipa A [4]

### 2.4.2. PLC linije tipa B

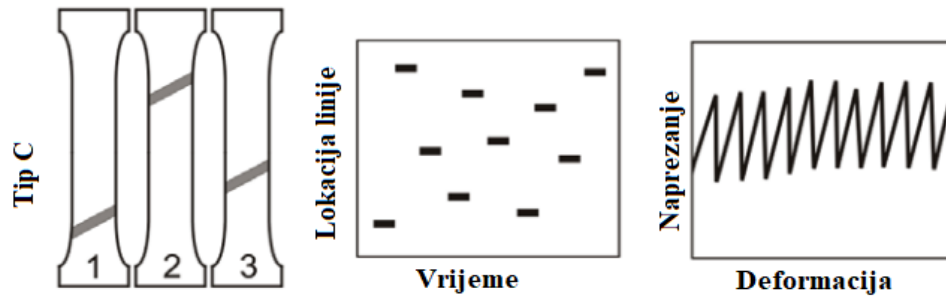
Linije tipa B su nešto pravilnije nazubljenosti, a javljaju se pri srednjoj brzini deformacije i temperature. Padovi napreznja kod linija tipa B su veći nego kod linija tipa A. Linije tipa B se šire na isprekidani način s otprilike jednakim razmacima, a amplitude i frekvencije kod vlačnog ispitivanja izgledaju nepravilno te su manje od linija tipa C. Na slici 14 je dan shematski prikaz kretanja, orijentacije i nazubljene krivulje za PLC liniju tipa B [4,25].



Slika 14. Shematski prikaz kretanja, orijentacije i nazubljene krivulje za linije tipa B [4]

### 2.4.3. PLC linije tipa C

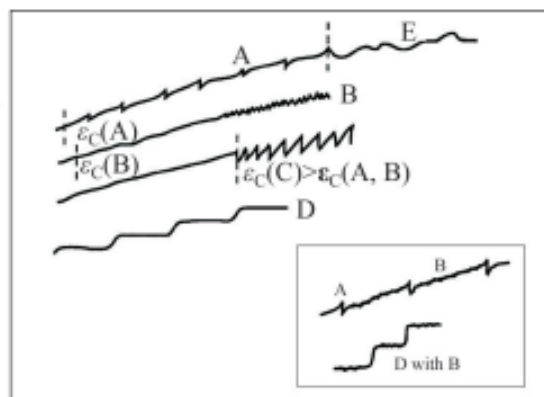
Linije tipa C su nasumično nukleirane i skaču po cijelom uzorku te imaju nazubljenje na krivulji oko određene amplitude i frekvencije. Linije tipa C se pojavljuju kod niske brzine deformacije. Za razliku od tipova linija A i B, kod linija tipa C se češće pojavljuje više pojaseva. Na slici 15 je dan shematski prikaz kretanja, orijentacije i nazubljene krivulje za PLC liniju tipa C [4,25].



Slika 15. Shematski prikaz kretanja, orijentacije i nazubljene krivulje za liniju tipa C [4]

### 2.4.4. Ostale PLC linije

Također postoje i prijelazne linije A+B kod kojih se nazubljenje tipova A i B javlja uzastopno tijekom eksperimenta. Također je zabilježeno postojanje prijelazne linije B+C, dok prijelazna linija A+B+C još uvijek nije zabilježena. Postojanje takvih tipova linija se pripisuje deformacijskom otvrdnjavanju i nestabilnosti vlačnog pokusa. Postojanje nomenklature tipova linija je dokaz neslučajne prirode dislokacijske dinamike, a dodatni tipovi D i E su uvedeni kako bi se razlikovali neki specifični uzorci primijećeni u komercijalnim legurama tijekom ispitivanja. Na slici 16 je dan prikaz ostalih PLC linija [4,22,38].



Slika 16. Prikaz ostalih PLC linija [12]

## 2.5. PLC efekt u čelicima i ostalim metalnim legurama

Nazubljena krivulja je zabilježena kod dvofaznih, kaljenih čelika te kod visokomanganskih TWIP čelika sa sadržajem mangana od 17-25 %. Povećanje sadržaja mangana snižava brzinu difuzije ugljika što dovodi do PLC efekta u TWIP čelicima. Međutim treba uzeti u obzir da su istraživanja na TWIP čelicima većinom rađena u hladno valjanom stanju, dok su oni u toplom

stanju neistraženi. Zanimljivo je da su tijekom istraživanja nazubljenja i njihove amplitude ovisile o temperaturi deformacije, na način da su nazubljenja veća kada se poveća temperatura deformacije [39].

Kod visokolegiranog CrMnNi TRIP čelika (X5CrMnNi17-7-4) u lijevanom stanju primijećen je PLC efekt i to u ograničenom polju deformacijskih temperatura i brzina deformacije. Nazubljena krivulja je primijećena pri brzini deformacije od  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  i temperaturama od  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  i  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , a pri povećanju brzine deformacije na  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  i temperaturi od  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  nije primijećen PLC efekt. Pojava nazubljenog toka kod TRIP čelika se pripisuje interakciji intersticijskih otopljenih atoma s pokretnim dislokacijama unutar martenzitne faze [40].

U FeMCC čelicima koji su osjetljivi na PLC efekt, kritično naprezanje potrebno za stvaranje PLC efekta se može smanjiti opuštanjem naprezanja. Poznato je da su ugljični čelici skloni PLC efektu, te se pretpostavlja da ta sklonost potječe od visokog sadržaja ugljika u čelicima. Ugljični čelici omogućuju lako prodiranje vodika koji može lako stupiti u interakciju s drugim atomima kao što su ugljik i dušik koji se nalaze u metalu te pospješuju interakciju svih otopljenih tvari s dislokacijama. Uobičajeno objašnjenje PLC efekta kod ugljičnih čelika temelji se na postizanju kritičnog naprezanja potrebnog za proizvodnju dovoljnog broja slobodnih mjesta koja dopuštaju difuziju ugljika u dislokacijske jezgre. No najnovija istraživanja pokazuju da je dinamika PLC efekta u intersticijskim legurama mnogo složenija od dinamike u supstitucijskim legurama Al-Mg. Legura CuZn30 je pri ispitivanjima pokazala PLC efekt, te su se pojavile PLC linije klasificirane kao linije tipa B [41].

Istraživanjem na kristalima  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  je uočena pojava PLC efekta, a sama pojava PLC efekta je pripisana starenju dislokacija itrijevih defekata [42]. Kod NiCr legure je dokazano pojavljivanje PLC efekta u rasponu deformacijskih temperatura od  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  te pri brzinama deformacije od  $10^{-5}$  do  $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  [43]. PLC efekt se pojavljuje kod superlegure Co-Ni leguri za metalurgiju praha i to u temperaturnom intervalu između  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  i  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  [44]. Kod kompozita AlCu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> koji sadrži keramičke čestice (60%) je također primijećena pojava PLC efekta pri čemu su keramičke čestice bile prepreke širenju linija [45].

## 2.6. PLC efekt u Al legurama

PLC efekt kod aluminijskih legura se javlja u specifičnom rasponu temperature te pri određenim brzinama deformacije. Kod nekih AlMg legura je uočena velika osjetljivost na PLC efekt pri konstantnim brzinama pomaka. Neka istraživanja [46] su pokazala kako je moguće suzbiti PLC efekt rafiniranjem zrna postupkom kutne ekstruzije. Kod nekih aluminijskih legura primijećeno je da precipitati igraju veliku ulogu u PLC efektu, jer veliki broj precipitata stvara prepreke gibanju pokretnih dislokacija te otežava difuziju [47].

U aluminijskim legurama pojavljuju se svi tipovi PLC linija, a to su: linija tipa A, linija tipa B, linija tipa C i kombinacije linija tipa B+C i B+A. Pojava tipova linija ovisi o brzini deformacije. Dokazano je kako različiti tipovi PLC linija različito utječu na duktilnost materijala [38].

Kod legure Al-2.5 %Mg istraživanjima je ustanovljeno da se pri povećanju brzine deformacije pojavljuju redom linije tipa C, zatim linije tipa B te linije tipa A [48].

Dodatak srebra u malim količinama može imati utjecaj na stvaranje Cottrell-ove atmosfere. Kod nekih aluminijskih legura mjerenje metodom DIC se pokazalo bolje za detekciju PLC efekta u odnosu na uobičajenu analizu kroz krivulju sila-produljenje, zbog toga što neke legure imaju mala nazubljenja koja su jedva vidljiva. Legura Al-5.6 %Mg na krivulji naprezanje-deformacija

je pokazala nazubljenje pri temperaturi od 0 do 25 °C , a pri temperaturama iznad 50 °C nazubljenje se pojavilo nakon određenog stupnja deformacije. Legura Al-8,6 % Mg je pokazala nazubljenje pri temperaturi od 0 °C do 10 °C, dok na temperaturama iznad 70 °C ne dolazi do pojave nazubljenja [49].

Na tablici 3 je dan prikaz istraživanja karakteristika linija za neke legure aluminija. Dimenzije uzorka kao što su duljina, širina i debljina su izražene u milimetrima. Kut linije je izražen u stupnjevima, dok je širina linije izražena u milimetrima. Brzina linije je izražena u milimetrima po sekundi [4]

Tablica 3. Prikaz nekih karakteristika PLC linija za neke legure aluminija [4]

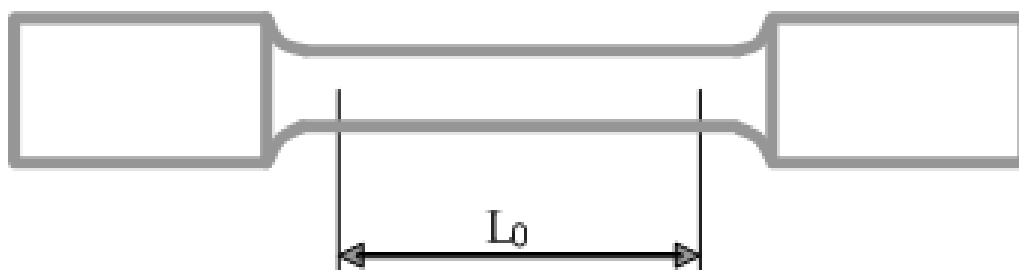
Legura	Duljina uzorka (mm)	Širina uzorka (mm)	Debljina uzorka (mm)	Kut linije (°)	Brzina linije (mm/s)	Širina linije (mm)
AA5754	54	46	1	24-36	20	1,61
AA5754	150	12.5	1	30-40		
Al-3.2%Mg	42	6	2	31.8	7-45	4-11
Al-3.2%Mg	42	6	2	31.3	160.3-187.2	2.6-5.4
AA5082	110	12.7	2.3	25-35	10-70	4-10
AA7020	110	12.7	1	20-33	10-60	3-11
AA5086	42	6.5	1	33	38-128	1.5
AA5052-H32	20	4,6	0.95	26		1.85
A2017	50	20	2	30		
Cu-15%Al	75	4	1,4	30	0.25	0.6-3
Cu-4%Al	60	12	3	28		3.3-3.6

### 3. METODE ISTRAŽIVANJA PORTEVIN-LE CHATELIEROVOG EFEKTA

#### 3.1. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje ima mnoge namjene, a s njime se mogu odrediti gornja granica razvlačenja, donja granica razvlačenja, vlačna čvrstoća, produljenje i kontrakcija. Vlačno ispitivanje se koristi pri određivanju materijala za razne upotrebe. Ispitivanje se provodi kako bi odredili osnovna mehanička svojstva materijala, kako bi se osiguralo da materijal zadovoljava specifikacije, te u ostale istraživačke svrhe [50].

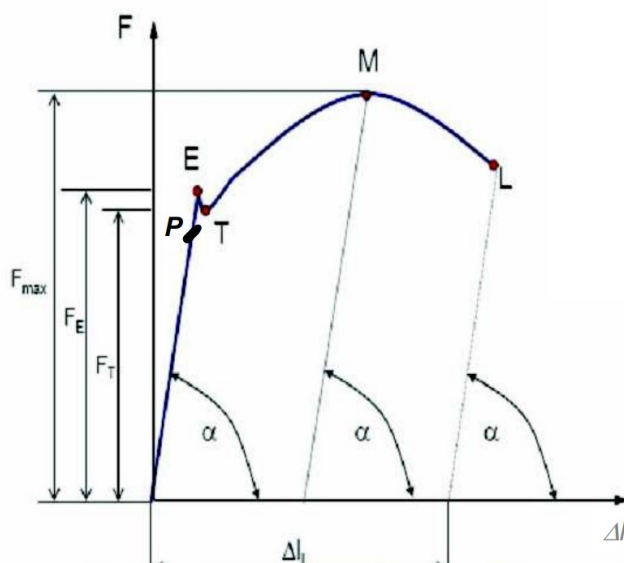
Slika 17 daje prikaz tipičnog uzorka za statičko vlačno ispitivanje. Uzorak ima široke krajeve, te mjerni dio. Uzorci mogu biti okrugli ili plosnati. Površina poprečnog presjeka mjernog dijela manja je od ramena i područja hvatanja, te će se deformacije pojaviti upravo u tom dijelu. Krajevi se mogu učvrstiti na nekoliko načina kao što su: hvatištima s navojem, držanjem između klinova te posebnim hvataljkama.



Slika 17. Prikaz uzorka za statičko vlačno ispitivanje,  $L_0$  označava mjerni dio ispitnog uzorka [51]

Uređaji na kojima se provodi statičko vlačno ispitivanje nazivaju se univerzalne kidalice, a njihova primarna funkcija je dobivanje dijagrama sila-produljenje. Kidalice mogu biti mehaničke ili hidrauličke. Ispitni uzorak se kontinuirano vlačno opterećuje na kidalici sve dok ne dođe do loma uzorka [50].

Iz dijagrama naprezanje-deformacija mogu se očitati sila na granici razvlačenja, maksimalna sila i konačna sila. Nakon što se dostigne sila na granici razvlačenja, uzorak se produljuje, a za daljnje rastezanje uzorka potrebno je povećanje sile. Sila se povećava sve do maksimalne sile, te se nakon toga uzorak produljuje uz sve manju silu. Kada se dostigne konačna sila, ispitni uzorak se lomi. Na slici 18 je dan prikaz dijagrama sila-produljenje s naznačenim karakterističnim točkama [51,52].



Slika 18. Prikaz dijagrama sila produljenje sa naznačenim karakterističnim točkama [52]

Kada se na kruti materijal djeluje sa malom silom, veze između atoma se šire. Pri prestanku djelovanja sile dolazi do opuštanja vezi, te se materijal vraća u prvobitni oblik. Takva povratna deformacija se naziva elastična deformacija. Kod svih materijala početni dio krivulje sila-produljenje je linearan, a nagib tog linearnog dijela se naziva modul elastičnosti [50,52].

Pri djelovanju visokih sila, ravnine atoma klize jedna preko druge, te se ta deformacija koja je nepovratna, kada se ukloni djelovanje sile, naziva plastična deformacija. Naprezanja koja su veća od granice razvlačenja dovode do plastične deformacije [50].

Iznosi naprezanja se mogu izračunati prema izrazu (3.1.1.) [52]:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} ; (\text{MPa}) \quad (3.1.1.)$$

pri čemu je:

$F$ - sila (N)

$S_0$  – početna površina poprečnog presjeka uzorka ( $\text{mm}^2$ )

Relativno produljenje se definira kao promjena duljine podijeljena s početnom duljinom, a računa se prema izrazu (3.1.2.) [52]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} (\text{mm/mm}) \quad (3.1.2.)$$

pri čemu je:

$L$  – konačna duljina uzorka (mm)

$L_0$  – početna duljina uzorka (mm)

Granica razvlačenja predstavlja najniže naprezanje pri vlačnom opterećenju kod kojeg dolazi do znatnog istezanja ispitivanog uzorka bez da dođe do povišenja sile. Ona se određuje iz dijagrama sila-produljenje. Granicu razvlačenja karakteriziraju dvije vrijednosti, a to su gornja granica razvlačenja  $R_{eh}$  i donja granica razvlačenja  $R_{el}$  [52].

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ (MPa)} \quad (3.1.3.)$$

Pri čemu je:

$F_e$  – sila (N)

$S_0$  – početna površina poprečnog presjeka epruvete ( $\text{mm}^2$ )

Naprezanje pri maksimalnoj sili se naziva vlačna čvrstoća, a označava se s  $R_m$ . Vlačna čvrstoća predstavlja osnovno mehaničko svojstvo na temelju kojeg se materijali vrednuju. Izraz za vlačnu čvrstoću prema (3.1.4.) glasi [52]:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ (MPa)} \quad (3.1.4.)$$

Pri čemu je:

$F_m$  – maksimalna sila (N)

$S_0$  – početna površina poprečnog presjeka ( $\text{mm}^2$ )

Vlačna čvrstoća nije maksimalno naprezanje, nego naprezanje pri maksimalnoj sili, te je vlačna čvrstoća jedno od osnovnih mehaničkih svojstava [50].

Kod materijala čiji je prijelaz iz područja elastične deformacije u područje plastične deformacije kontinuiran, određuje se granica razvlačenja  $R_p$ . To je ono naprezanje koje će ostaviti u materijali određenu plastičnu deformaciju nakon rasterećenja uzorka i obično iznosi 0,2% [52].

Naprezanje pri kojem dolazi do loma uzorka se zove još i konačno naprezanje. Konačno naprezanje se označava sa  $R_k$ , a računa se prema izrazu (3.1.5.) [52]:

$$R_k = \frac{F_k}{S_0} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (3.1.5.)$$

Pri čemu je:

$F_k$  – konačna sila (N)

$S_0$  – početna površina poprečnog presjeka ( $\text{mm}^2$ )

Uz navedene osnovne vrijednosti mehaničkih svojstava, statički vlačni pokus je moguće koristiti i u druge svrhe. Tako na primjer promjenom regulacije nanošenja naprezanja ili promjenom brzine deformiranja, moguće je simulirati različita stanja, te promatrati promjene koje se odvijaju pri očvršćivanju i u vrijednostima mehaničkih svojstava. Također se primjenjuju i pri istraživanju PLC efekta.

### 3.2. Infracrvena termografija

Infracrvena termografija je znanost koja se bavi mjerenjem temperaturnih promjena na površini materijala. To je metoda ispitivanja materijala bez razaranja, a za mjerenje je potrebna infracrvena kamera te softver za obradu podataka. Slike koje se prikupljaju korištenjem infracrvene kamere, pretvaraju se u vidljive slike sa dodijeljenom bojom za svaki infracrveni energetska nivo. Takve slike se nazivaju termogrami [53]



Infracrvena termografija ima mnoge prednosti u odnosu na druge metode ispitivanja, a najvažnije su: beskontaktno mjerenje, mjerenje bez razaranja, rezultati su dvodimenzionalni, mjerenje u realnom vremenu, nema štetnih posljedica kao kod drugih tehnologija ispitivanja bez razaranja kao što je npr. rendgen. Nedostaci ove metode su: relativno visoka cijena opreme za ispitivanje te obuka za interpretaciju podataka. Infracrvena termografija je ovisna o radnim uvjetima kao što su temperatura okoline, protok zraka i vlažnost zraka. Zbog toga se mjerenje mora obaviti u kontroliranim uvjetima [54].

Infracrveno zračenje je energija koju emitira površina objekta čija je temperatura iznad apsolutne nule. Emitirano zračenje je funkcija temperature što znači da što je viša temperatura objekta, veći je intenzitet emitiranog infracrvenog zračenja. Energija zračenja se može raspršiti na predmet apsorpcijom, transmisijom i refleksijom. Udjeli energije zračenja koji su povezani sa navedenim načinima raspršivanja, nazivaju se koeficijenti apsorpcije, transmisije i refleksije. Materijali kod kojih su koeficijenti transmisije i refleksije jednaki nuli, nazivaju se idealna crna tijela. Idealna crna tijela apsorbiraju svu udarnu energiju zračenja, a u prirodi ne postoji pravo crno tijelo. Crno tijelo je idealan radijator, a Planckov zakon pokazuje da crno tijelo emitira predvidljivo i karakteristično zračenje u odnosu na vlastitu temperaturu [53].

Valna duljina na kojoj se emitira elektromagnetsko zračenje ovisi o temperaturi tijela, te što je veća temperatura kraća je valna duljina. Brijeg valne duljine za određenu temperaturu može se izračunati pomoću Wien-ovog zakona koji se dobije diferencijacijom Planck-ovog zakona. Kako bi se dobio ukupni intenzitet hemisfernog zračenja crnog tijela, Planck-ov zakon se integrira kroz sve valne duljine od nule do beskonačnosti. Tako se dobije jednadžba (3.2.1.) koja se naziva Stefan-Boltzmann-ova jednadžba, a ona glasi [54].

$$W_b = \sigma * T^4 \quad (3.2.1.)$$

Emisivnost tijela je definirana za valnu duljinu  $\lambda$  kao omjer energije zračenja koju tijelo emitira naspram zračenja koje bi emitiralo crno tijelo iste temperature. Jednadžba (3.2.2.) za emisivnost glasi [53]:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_\lambda}{W_{\lambda b}} \quad (3.2.2.)$$

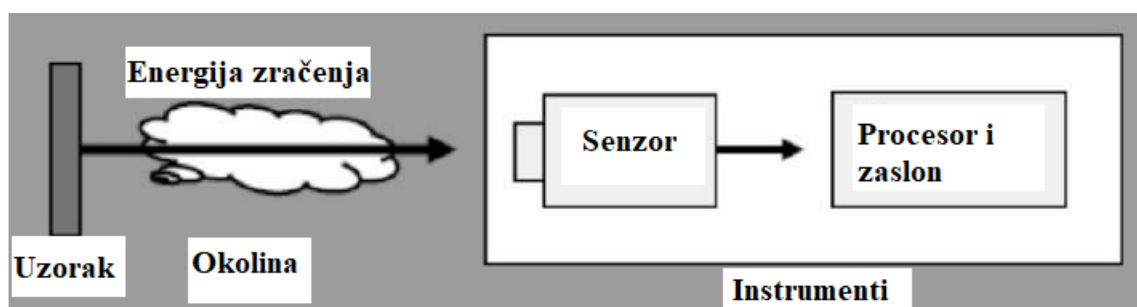
Pravo tijelo emitira samo dio toplinske energije koju emitira crno tijelo na istoj temperaturi, a ako je emisivnost konstanta i neovisna o valnoj duljini, tijelo se naziva sivo tijelo. Emisivnost stvarnih tijela nije konstantna niti neovisna o valnoj duljini, pa se stvarna tijela ne mogu smatrati sivim tijelima. No obično se pretpostavlja da za kratke valne duljine emisivnost možemo smatrati konstantnom, te se ta pretpostavka koristi za tretiranje stvarnih tijela kao sivih. To znači da iako je emisija stvarnih tijela ovisna o valnoj duljini te se prema tome oni ne mogu smatrati istinski sivim tijelima, njih se tretira kao takve prosjekom njihove emisije kroz kratke intervale u kojima rade infracrveni senzori. No to ne vrijedi za plinove ili tekućine [53]. Daljnjim uvrštavanjem u formulu dobije se Stefan-Boltzmann-ova jednadžba (3.2.3.) za siva tijela te ona glasi [54]:

$$W = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (3.2.3.)$$

Kako bi se dobila jednadžba za realna tijela, potrebno je gornju jednadžbu pomnožiti sa površinom tijela. Jednadžba (3.2.4.) za realna tijela glasi [53]:

$$W = A * \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (3.2.4.)$$

Svako tijelo čija je temperatura viša od temperature apsolutne nule ( 0 K/ -273,15 °C) emitira infracrveno zračenje. Infracrveno zračenje nije vidljivo golim okom. Detekcija infracrvenog zračenja se vrši sa infracrvenim detektorima, pri čemu infracrveni detektori određuju intenzitet infracrvenog zračenja. Kako bi vidjeli infracrveno zračenje, detektor zabilježi intenzitet infracrvenog zračenja, pretvara ih u električni signal. Pritom se svakom električnom signalu dodjeljuje određena boja koja se vidi na termalnoj slici. Snimanjem metodom termografije se dakle nevidljivi infracrveni spektar pretvara u spektar vidljiv ljudskom oku u obliku boja. Pritom je važno nadodati kako se metodom termografije ne može promatrati temperatura unutar tijela, već samo na površini tijela [55]. Na slici 19 je dan shematski prikaz mjerenja infracrvenom termografijom.



Slika 19. Shematski prikaz mjerenja infracrvenom termografijom [56].

Pri ispitivanju PLC efekta metodom termografije mjerenjem temperaturnih promjena na površini uzorka možemo vizualizirati pojavu PLC linija na uzorku. Osim vizualiziranja PLC linija također se mogu mjeriti i temperaturne promjene na površini uzorka izazvane pojavom PLC linija. Ovom metodom ispitivanja se može raditi usporedba pri različitim uvjetima ispitivanja [55].

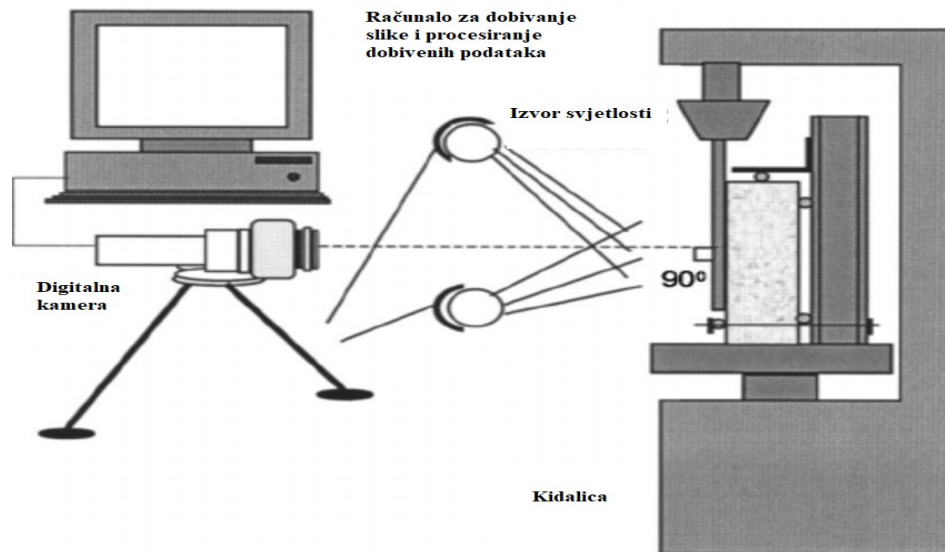
### 3.3. Digitalna korelacija slike

Digitalna korelacija slike (DIC – Digital Image Correlation) je beskontaktna tehnika za mjerenje pomaka usporedbom digitalnih slika površine uzorka slikanih prije i poslije deformacije, iz čega je naknadno analizom moguće odrediti površinske deformacije. Digitalna korelacija slike je jednostavna za korištenje, isplativa te se koristi za istraživanje deformacija inženjerskih materijala. Prednosti digitalne korelacije slike su: jednostavno postavljanje, jednostavna priprema uzorka, sposobnost rada bez posebnog osvjetljenja te velika točnost mjerenja. Glavno ograničenje je to što površina uzorka mora biti ravna sa nasumično nanesenim markerima [57].

Digitalna korelacija slike može biti 2D i 3D. Njome se mogu izračunati pomaci, deformacije, razine deformacije, brzine i zakrivljenost. Materijali koji se obično testiraju ovom tehnikom su: metali, polimeri, beton, geološki uzorci, biološka tkiva i dr. Danas postoji mnogo različitih metodologija i softvera za analizu podataka dobivenih digitalnom korelacijom slike. Kod 2D metode dovoljna je samo jedna kamera, dok 3D metoda zahtjeva minimalno dvije kamere [58].

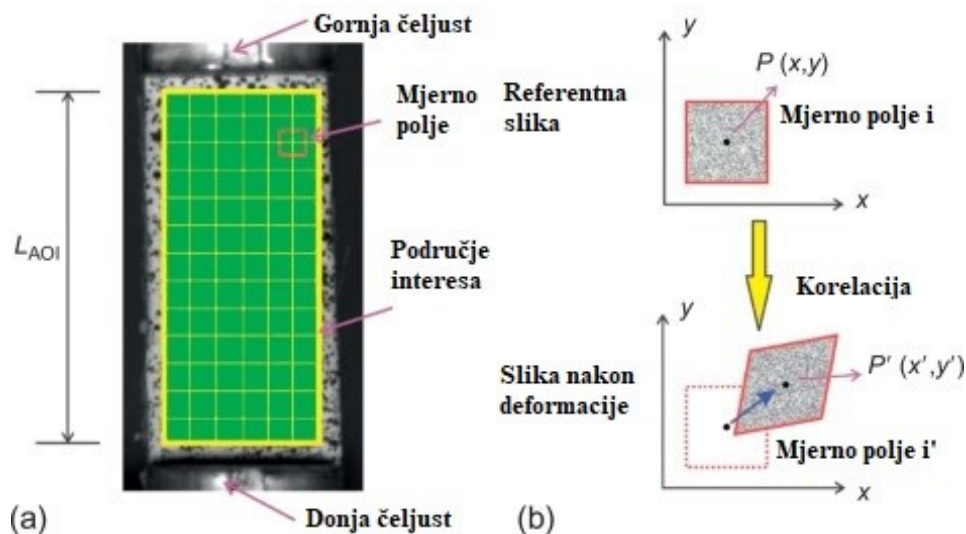
Digitalna korelacija slike uključuje tri koraka: priprema i postavljanje uzorka, snimanje slike uzorka tijekom ispitivanja te obradu slika korištenjem korelacijskog algoritma putem računalnog programa. Kamera se postavlja okomito na površinu uzorka s optičkom osi

usmjerenom na geometrijskom središtu uzorka. Na slici 20 je prikazan shematski prikaz mjerenja metodom digitalne korelacije slike [58].



Slika 20. Shematski prikaz mjerenja metodom digitalne korelacije slike [59]

Površina uzorka mora biti ravna i mora ostati u istoj ravnini okomitoj na os kamere tijekom ispitivanja. Površina uzorka mora imati na sebi nasumične markere koji se najčešće nanose lakom. Marker koji se nanose su najčešće točke, različite veličine i oblika, nasumično raspoređene po uzorku. Za kvalitetnu DIC analizu, potrebno je da uzorak na promatranom objektu ima dobar kontrast u odnosu na pozadinu, stoga se najčešće uzorci prethodno prešpricaju crnom ili bijelom bojom, a markeri se nanose naknadno suprotnom bojom kako bi se ostvarilo što bolji kontrast. Prije početka snimanja potrebno je snimiti referentnu sliku. Zatim je potrebno odrediti i unesti parametre u korelacijski program kao što su veličina mjernog polja i udaljenost točaka. Prilikom ispitivanja promatraju se položaji nanosenih markera, a korelacijski program izračunava pomake markera u odnosu na referentnu sliku [60], slika 21.



Slika 21. Princip rada DIC analize, a) prikaz područja interesa i mjernog polja na uzorku, b) shematski prikaz principa korelacije između referentne slike i slike nakon deformacije [61]

Slika 21 prikazuje, a) područje interesa i mjerno polje na uzorku i b) shematski prikaz principa korelacije između referentne slike i slike nakon deformacije.

U ovom istraživanju korišten je korelacijski program GOM correlate. Analiza pomaka i deformacija u korelacijskom programu GOM correlate se provodi pomoću koncepta komponenti. Točke se podijele u koherentne grupe i definiraju se kao komponente, te se tada mogu izračunati pomaci. Za određivanje translacije i rotacije u svim smjerovima primjenjuje se analiza sa šest stupnjeva slobode kretanja. Pomaci se računaju uz pomoć unaprijed definiranih načela inspekcije [60,62].

#### **4. EKSPERIMENTALNI DIO**

Ispitivanja su provedena statičkim vlačnim pokusom uz paralelno snimanje deformacije termovizijskom kamerom i digitalnom kamerom za DIC metodu na uzorcima AlMg legure 5083 u lijevanom stanju.

##### **4.1. Priprema uzoraka**

Ispitivanja su provedena na uzorcima AlMg legure 5083 u lijevanom stanju. Ispitni uzorci su uzimani iz lijevanih blokova u smjeru lijevanja. Uzorci su rezani vodenim mlazom na manje lamele te naknadno strojno obrađeni na CNC stroju, slika 22. Dimenzije mjernog područja uzoraka je 55 x 20 x 3 mm.



Slika 22. Prikaz ispitnog uzorka

##### **4.2. Metode ispitivanja**

###### **4.2.1. Statičko vlačno ispitivanje**

Ispitivanja na uzorcima su provedena na kidalici Hegewald & Peschke Inspekt table 100. Tijekom ispitivanja postavljena je procedura kako bi se osigurao konstantan pomak kidalice s brzinom razvlačenja. Brzina razvlačenja uzoraka je postavljena konstantnom i iznosila je 20 mm/min. Na slici 23 je prikazana kidalica Hegewald & Peschke inspekt table 100.



Slika 23. Prikaz kidalice Hegewald & Peschke Inspekt table 100

Za analizu podataka dobivenih statičkim vlačnim ispitivanjem korišten je program LabMaster Tensile test 2.9.4.9. koji se može koristiti u svim područjima istraživanja materijala, a uvjeti ispitivanja se mogu podesiti.

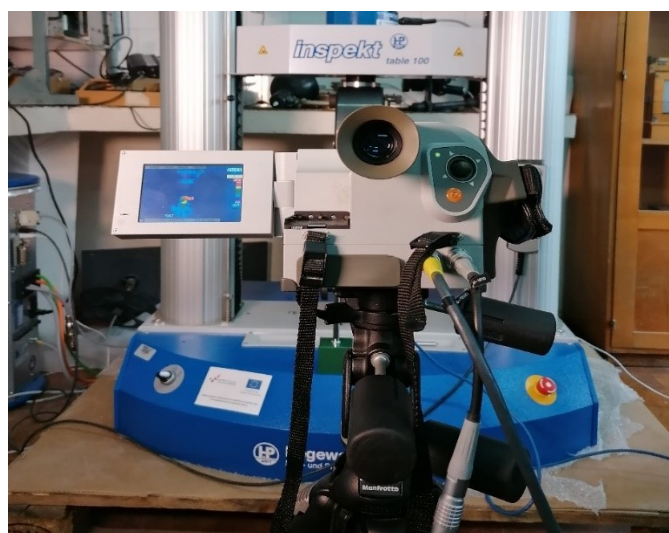
#### 4.2.2. Metoda termografije

Metoda termografije je korištena usporedno sa statičnim vlačnim pokusom, te uz metodu digitalne korelacije slike. Za metodu termografije korištena je kamera za termografiju Jenoptik VarioCAM® M82910, a njen prikaz je dan na slici 24. Jenoptik VarioCAM® M82910 je infracrvena kamera. Kućište joj je robusno, a ima mogućnost hvatanja pojedinih termalnih slika i/ili videa do 50 slika u sekundi. Njezino mjerno područje je od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . U nižem temperaturnom intervalu područje osjetljivosti iznosi i do 80 mK, a širina spektra iznosi od 8 do 13  $\mu\text{m}$ . Rezolucija kamere Jenoptik VarioCAM® M82910 iznosi 320x240 piksela.



Slika 24. Prikaz termalne kamere Jenoptik VarioCAM® M82910

Snimanje termalnom kamerom provedeno je tijekom statičnog vlačnog ispitivanja sve do loma uzorka, što je prikazano na slici 25.



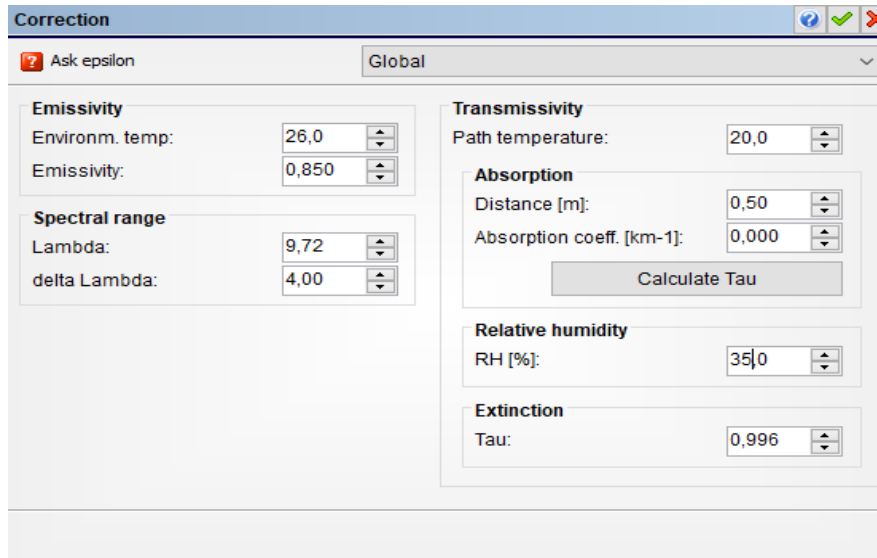
Slika 25. Prikaz termalne kamere Jenoptik VarioCAM® M82910 tijekom statičnog vlačnog pokusa

Prije početka ispitivanja uzorke je potrebno premazati s crnim mat premazom. Crni mat premaz koristi se kako bi se postigao visoki faktor emisivnosti, a premaz se ne smije odvajati od uzorka. Na slici 26 je dan prikaz uzorka bez premaza (a) i uzorka s crnim mat premazom (b).



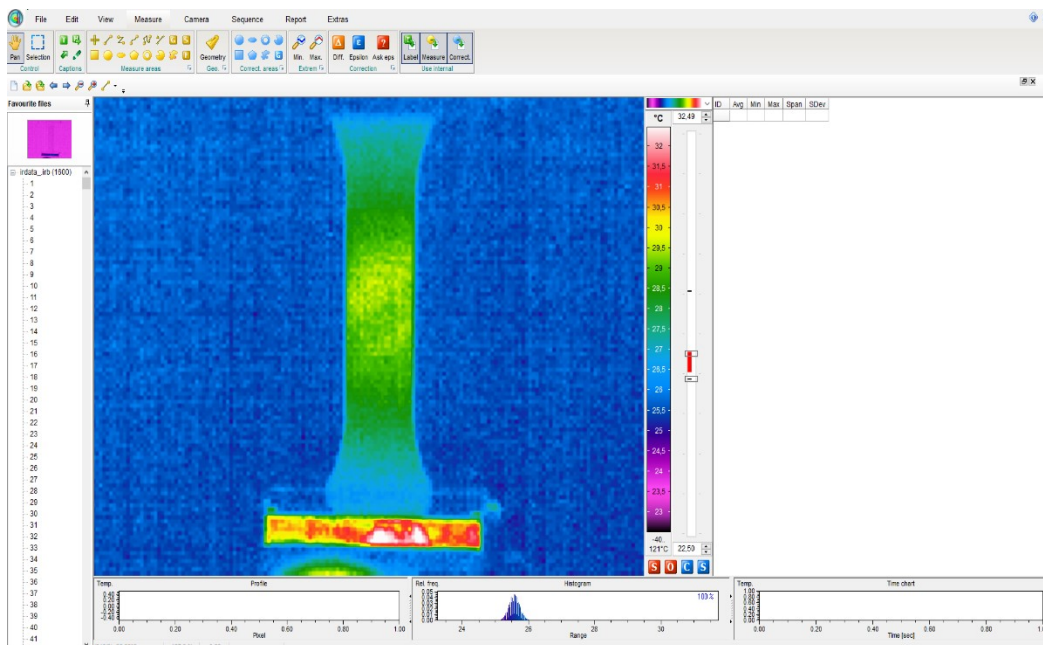
Slika 26. Prikaz ispitnih uzoraka za ispitivanje a) bez premaza i b) s crnim mat premazom

Faktor emisivnosti crnog mat premaza iznosi 0,95. Kamera se nalazila na udaljenosti od 0,5 m od ispitivanog uzorka. Temperatura okoline je iznosila 26 °C, dok je relativna vlažnost zraka iznosila 35 %. Ti parametri su važni jer se moraju unesti u program kako bi mjerenje bilo što preciznije, što je prikazano na slici 27.



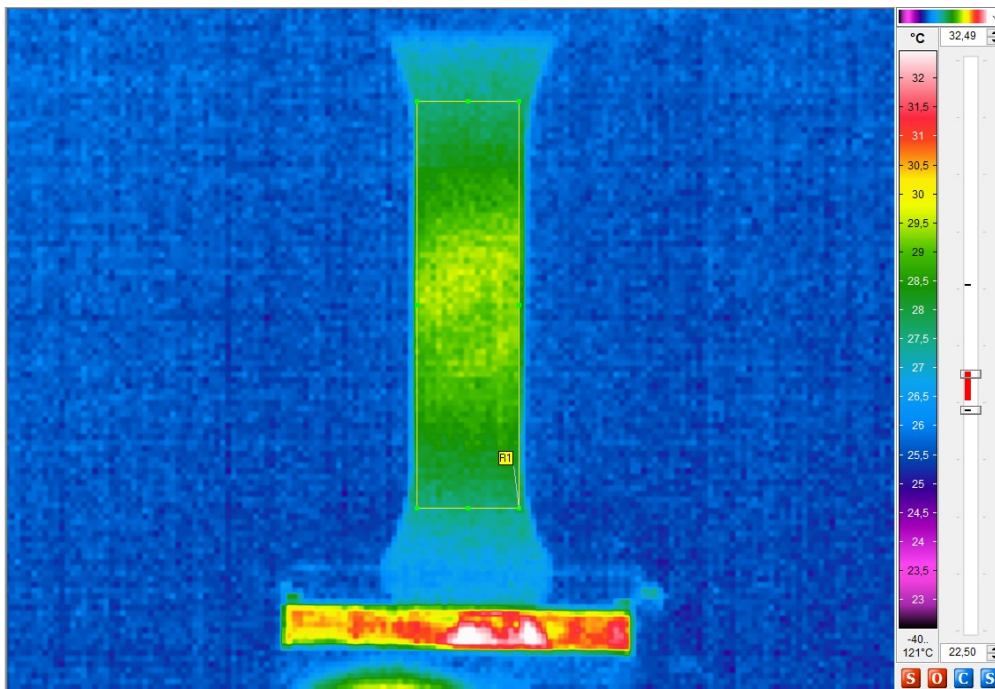
Slika 27. Prikaz parametara u programu IRBIS 3 Professional

Za analizu rezultata dobivenih metodom termografije korišten je program IRBIS 3 Professional. Na slici 28 je prikazano sučelje programa IRBIS 3 Professional. Kako bi se provela analiza metodom termografije snima se velik broj termograma. Moguće je odrediti promjene temperature, te promjene temperature tijekom procesa deformacije.



Slika 28. Prikaz sučelja programa IRBIS3 Professional

Temperaturnu raspodjelu smo promatrali na način da smo unutar programskog paketa podesili mjerenje temperature promjene u odnosu na početno stanje, a analiza je bila na cijeloj površini uzorka, kao što je prikazano na slici 29.



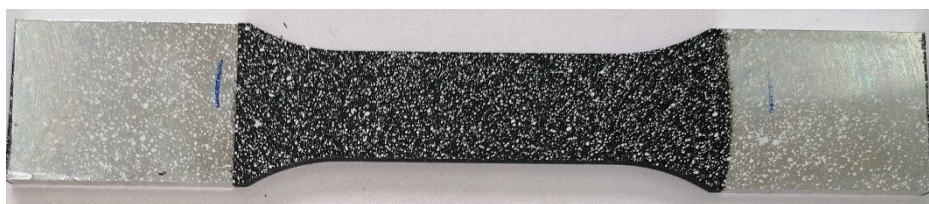
Slika 29. Prikaz analize na cijeloj površini uzorka

Naknadno su provedena kvantitativna i kvalitativna analiza snimljenih termograma, čiji su rezultati korišteni za usporedbu s rezultatima DIC analize i statičkog vlačnog pokusa.

#### 4.2.3. Metoda digitalne korelacije slike (DIC)

Metoda digitalne korelacije slike se koristila usporedno sa metodom statičkog vlačnog ispitivanja i s metodom termografije. Metoda digitalne korelacije slike se provodi tako da se s optičkom kamerom snimaju slike prije i tijekom deformacije. Tako snimljene slike se obrađuju u korelacijskom programu.

Prije početka ispitivanja metodom digitalne korelacije uzorci se moraju pripremiti. Uzorci se pripremaju na način da se nanese bijeli nasumični markeri preko crnog mat premaza na površini uzorka. Pomak bijelih markera se analizira u korelacijskom programu, a iz tih pomaka je kasnije moguće odrediti iznos deformacije u bilo kojoj točki. Na slici 30 je prikazan ispitni uzorak s nasumično nanesenim bijelim markerima.



Slika 30. Prikaz ispitnog uzorka sa nasumično nanesenim bijelim markerima

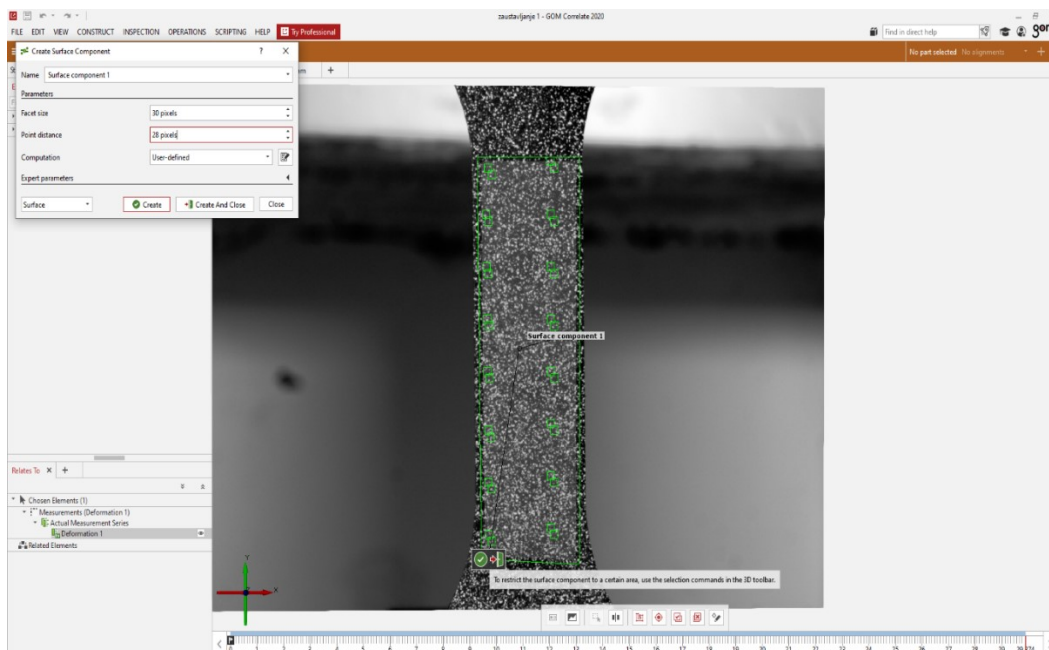


Kamera se mora podesiti za snimanje, te se mora osigurati izvor svjetlosti kako bi mjerenje bilo što preciznije. Kamera se postavlja okomito na ispitni uzorak, a uzorci su istodobno ispitivani s termalnom kamerom i kamerom za DIC. Korištena kamera za metodu digitalne korelacije slike je digitalna monokromatska kamera sa CMOS senzorom. Udaljenost kamere od uzorka je iznosila 21 cm. Kamera za DIC je prikazana na slici 31.



Slika 31. Prikaz kamere za DIC

Kamera za DIC snima veliki broj slika koje se analiziraju u korelacijskom programu. Korelacijski program za analiziranje snimljenih slika koji se koristio u ovom istraživanju je GOM Correlate 2020. Korelacijski program analizira snimljene slike preko pomaka bijelih markera na površini ispitnih uzoraka. Na slici 32 je prikazano sučelje korelacijskog programa GOM Correlate 2020.



Slika 32. Prikaz sučelja korelacijskog programa GOM Correlate 2020

Kako bi mjerenje metodom digitalne korelacije slike bilo što preciznije potrebno je unesti određene parametre u korelacijski program. Prvo se u korelacijski program unosi referentna slika prije početka ispitivanja. Veličina mjernog polja (facet size) je iznosila 30 piksela, a veličina koraka (point distance) je iznosila 28 piksela te su ti parametri bitni kod analize metodom digitalne korelacije slike kako bi se ostvarilo što točnije mjerenje.

#### 4.2.4 Metalografska analiza

Kako bi se istražilo što se točno događa na samoj liniji u početku generiranja prve linije provedeno je metalografsko ispitivanje mikrostrukture na samoj liniji i iza linije. Za to su korišteni posebni uzorci, koji su razvlačeni do pojave prve linije, te se trenutno zaustavljao statički vlačni pokus. Trenutak formiranja prve linije i njen položaj pri zaustavljanju je određen termografskom metodom i DIC metodom. Mikrostruktura se ispitivala tako da su se izrezali uzorci u području najbližem mjestu generiranja prve PLC linije, te se mikrostruktura ispitivala ispred PLC linije, na samoj PLC liniji te iza PLC linije. Uzorak je izrezan na rezalici Buehler ABRASIMET 2 uz hlađenje vodom na odgovarajuće dimenzije. Na slici 33 prikazan je uređaj Buehler ABRASIMET 2 za rezanje uzoraka.



Slika 33. Fotografija uređaja za rezanje uzoraka Buehler ABRASIMET 2

Nakon rezanja, uzorci su ulagani u masu Conductomet Buehler na preši SimpliMet 1000. SimpliMet 1000 je prikazan na slici 34.



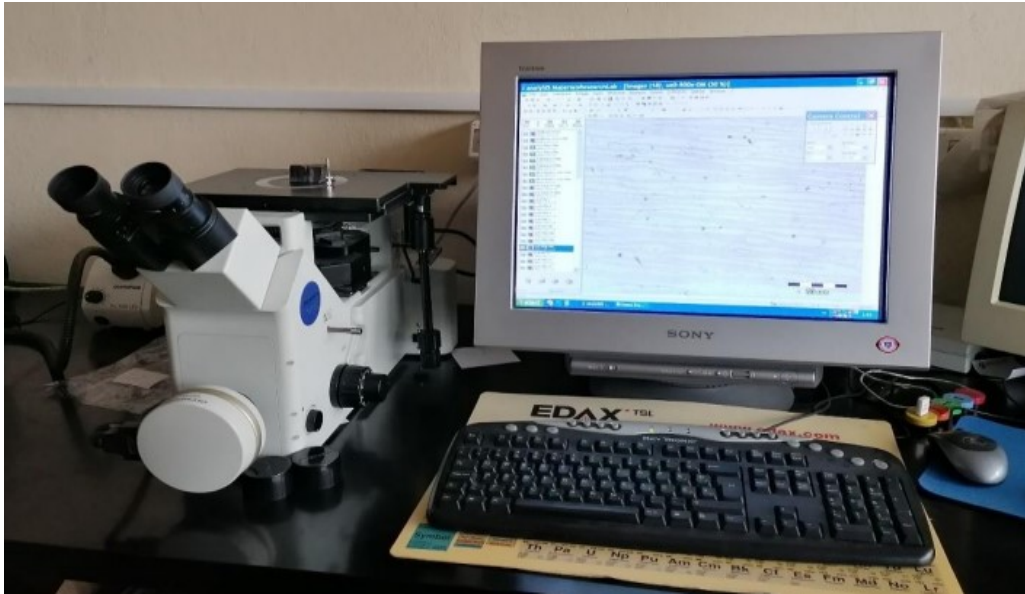
Slika 34. Fotografija uređaja za ulaganje uzoraka SimpliMet1000

Nakon što je završeno ulaganje uzoraka, provedeno je brušenje uzoraka na uređaju PHOENIX BETA GRINDING/POLISHER s glavom Vector LC koji je prikazan na slici 35 uz stalno hlađenje vodom.



Slika 35. Fotografija uređaja za brušenje i poliranje PHOENIX BETA GRINDING/POLISHER

Za brušenje su korišteni papiri gradacije 120, 240, 400, 600 i 800. Zatim je na istom uređaju provedeno poliranje uzoraka. Poliranje se provodilo filcom uz dodatak vodene otopine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Nakon poliranja provedeno je nagrivanje uzoraka sa Poulton otopinom (12 ml konc.  $\text{HCl}$  + 6 ml  $\text{HNO}_3$  + 1 ml  $\text{HF}$  (48 %) + 1 ml  $\text{H}_2\text{O}$ ). Nakon završetka nagrivanja, uzorci su snimani svjetlosnim mikroskopom Olympus GX51 opremljenim digitalnom kamerom DP70, te uz programski paket AnalySIS Materials Research Lab. Snimanje svjetlosnim mikroskopom je provedeno pri povećanjima od 50x, 100x, 200x, i 500x. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51 s kamerom DP70 je prikazan na slici 36.



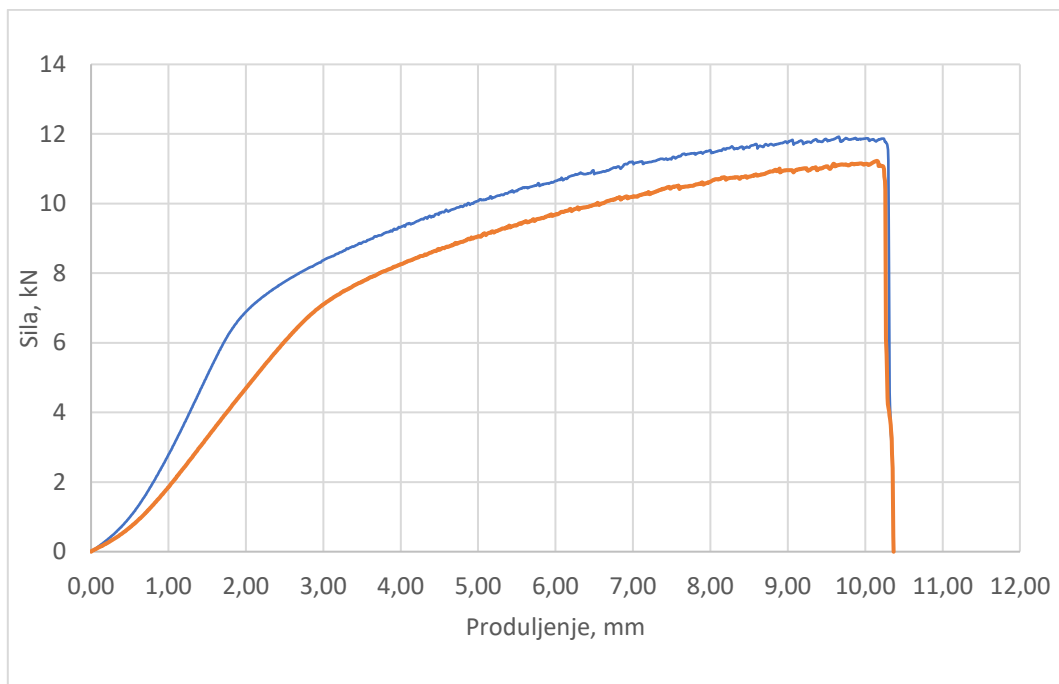
Slika 36. Fotografija svjetlosnog mikroskopa Olympus GX51 s kamerom DP70

## 5. REZULTATI I RASPRAVA

Kao što je opisano u eksperimentalnom dijelu, ispitivanja su provedena statičkim vlačnim pokusom uz paralelno snimanje deformacije termovizijskom kamerom i digitalnom kamerom za DIC metodu.

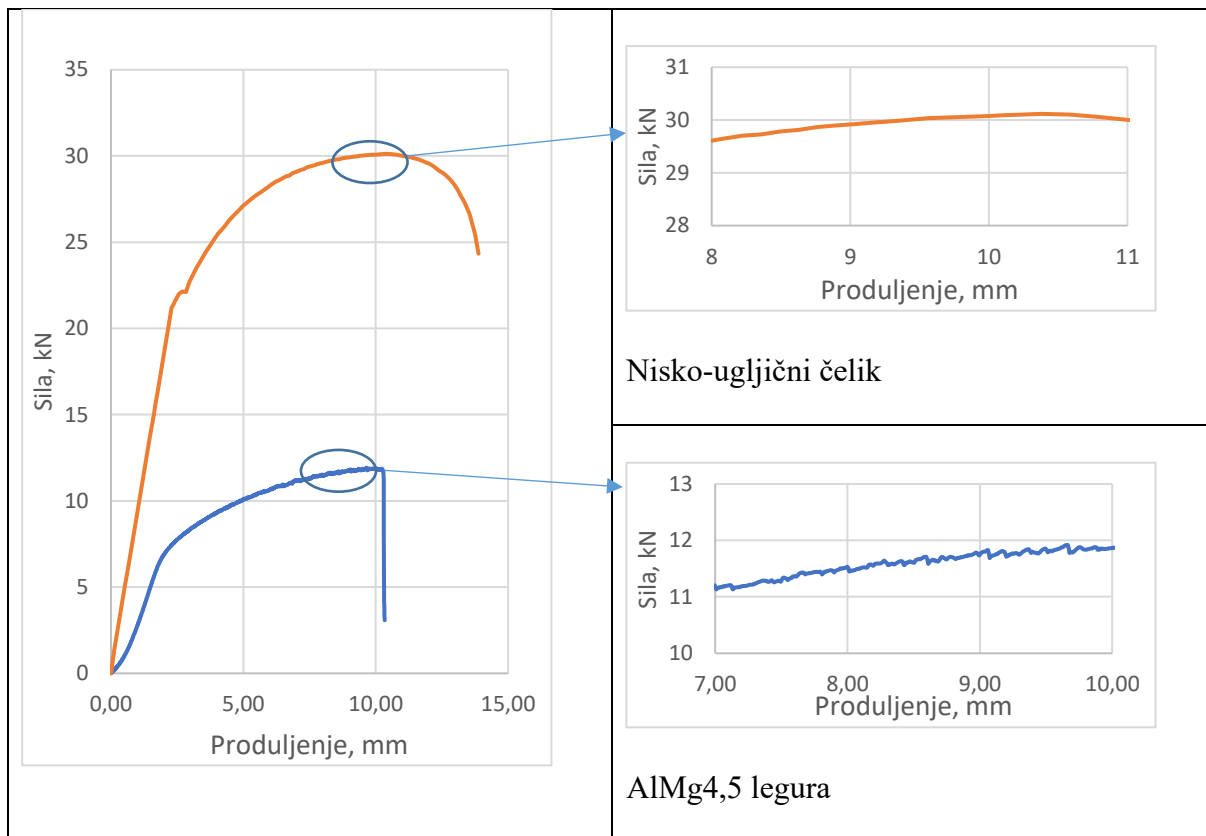
### 5.1. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja ukazuju kako se radi o leguri vlačne čvrstoće 185-200 MPa, s izduženjem od 9 do 10 %. Na slici 37 je prikazan dijagram sila-produljenje dobiven statičkim vlačnim ispitivanjem na uzorcima iz legure AlMg4,5.



Slika 37. Dijagram sila-produljenje dobiven statičkim vlačnim ispitivanjem na uzorcima iz legure AlMg4,5

Cilj ove analize je bio prikazati oblik dobivenih dijagrama. Na dijagramu su vidljive oscilacije u sili, točnije naprezanju tijekom cijelog područja plastične deformacije uzorka. Za usporedbu, na slici 38, dan je usporedni prikaz jednog dijagrama za materijal koji ne pokazuje navedene oscilacije u plastičnom području, paralelno s ispitivanom legurom aluminija koji pokazuje oscilacije.

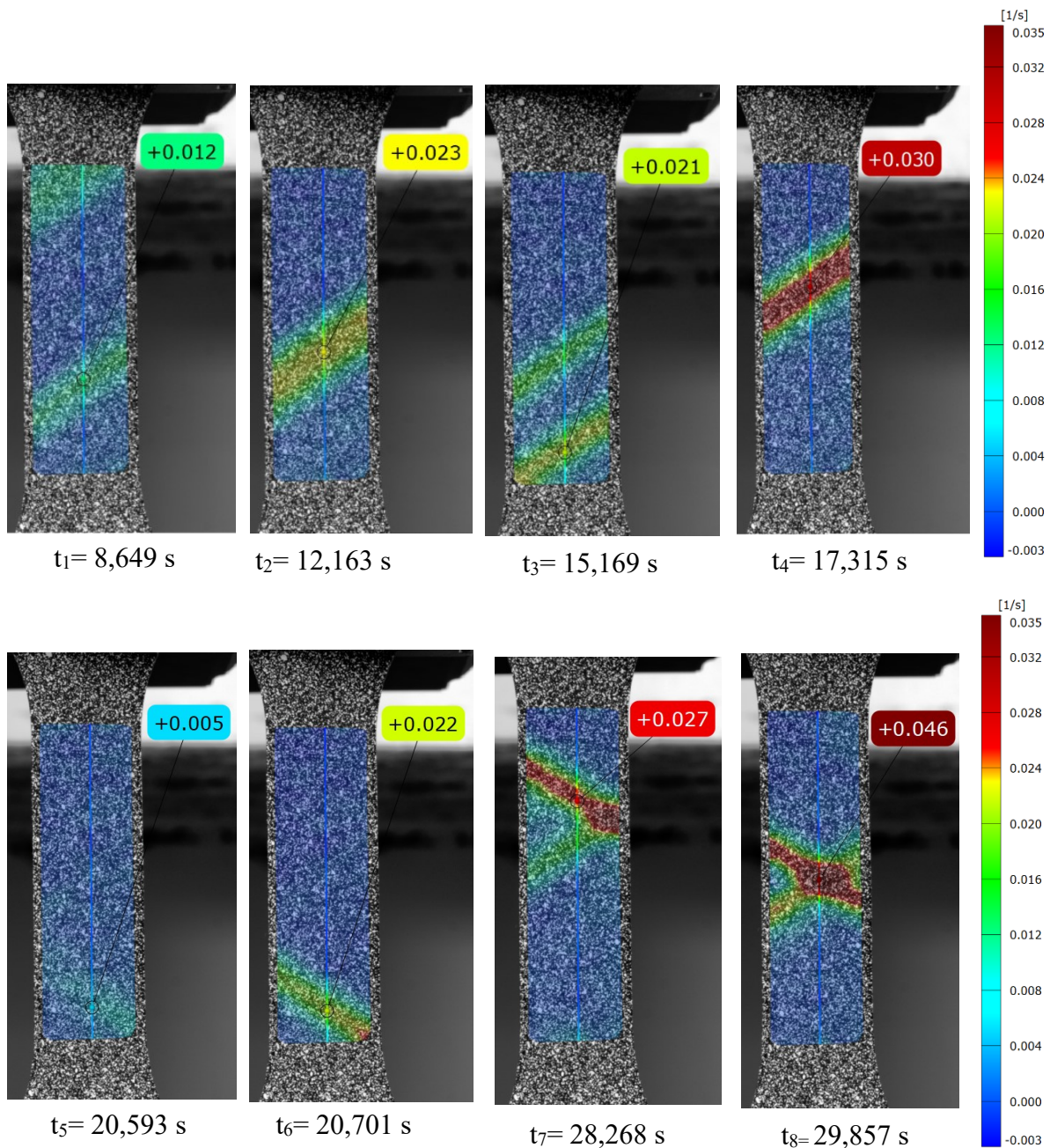


Slika 38. Usporedni prikaz dijagrama sila produljenje nisko-ugljičnog čelika i AlMg4,5 legure

Usporedbom dijagrama na slici 38, jasno je vidljivo kako navedene oscilacije u naprezanju nisu uočljive na dijagramima sila - produljenje kod nisko-ugljičnog čelika, dok kod ispitivane legure AlMg4,5 se jasno uočavaju oscilacije u izmjeranim vrijednostima naprezanja i sile tijekom plastične deformacije uzoraka na kidalici. Ove pojave povezane su u literaturi [29] s formiranjem i propagacijom PLC linija tijekom plastičnog deformiranja. Kako bi to dokazali provedena je analiza termografskih snimanja i DIC analiza uzoraka.

## 5.2. Rezultati analize kvalitativnih vrijednosti dobivenih metodom digitalne korelacije slike (DIC)

Na slici 39 su prikazane uočene promjene tijekom snimanja digitalnom korelacijom slike (DIC).



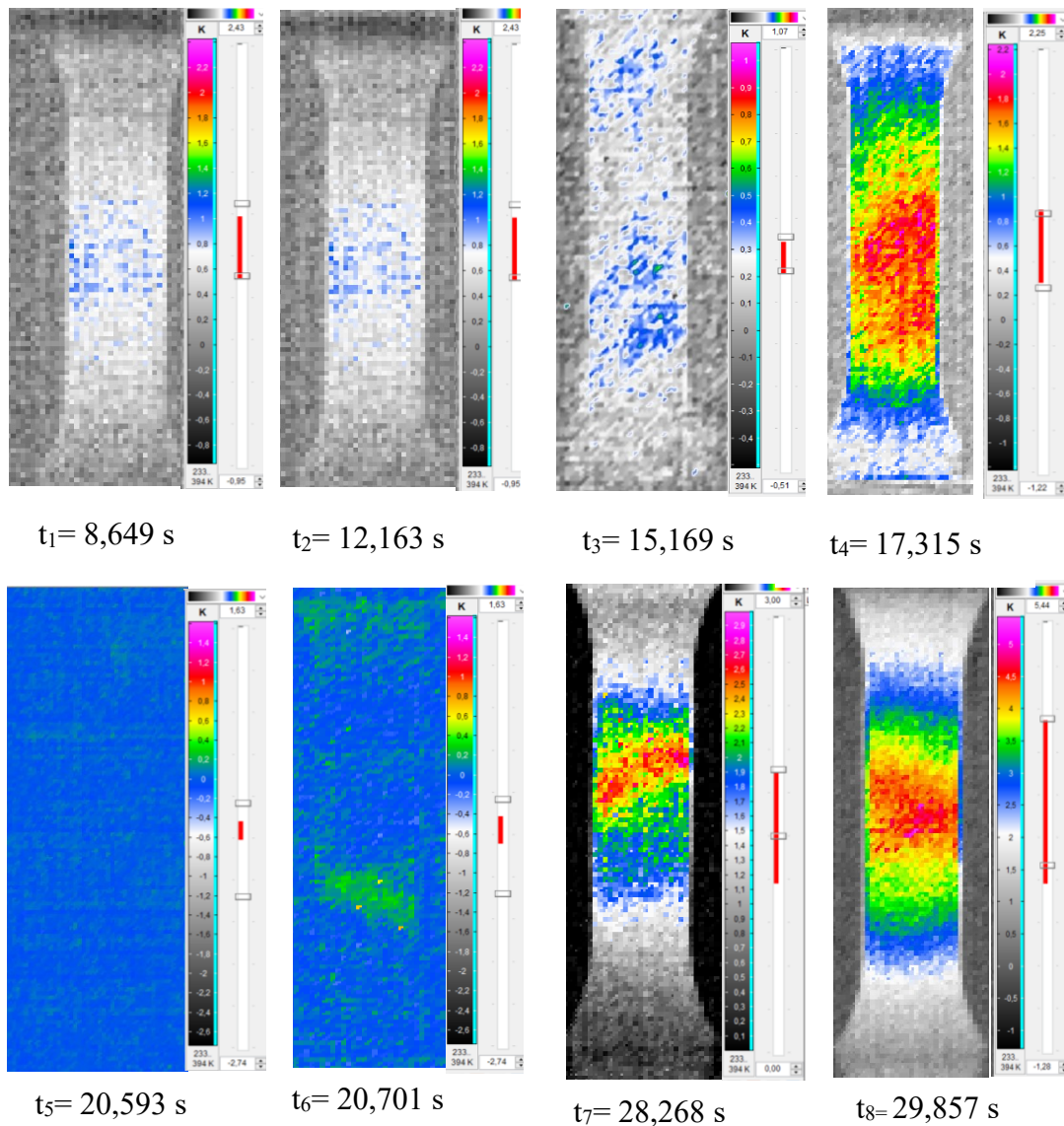
Slika 39. DIC prikaz formiranja i propagacije višestrukih linija

Kako je promatrana pojava PLC efekta vrlo brza i jasno uočljiva na videu tijekom DIC analize, na slici 39 je dan prikaz određenih trenutaka tijekom statičnog vlačnog pokusa. U trenutku  $t_1$ , slika 39, prva linija je formirana i počinje propagaciju. Ona je jasno vidljiva u trenutku  $t_2$ , slika 39, te nastavlja svoju propagaciju prema gornjem dijelu uzorka. Nakon toga dolazi do formiranja novih linija, kao što je prikazano u  $t_3$ , slika 39. Sada nova linija propagira i ovo se

tijekom cijelog perioda deformacije ponavlja. U određenim periodima dolazi do formiranja istovremeno više linija koje se javljaju čak u obliku slova X na uzorku,  $t_7$  i  $t_8$  slika 39.

### 5.3. Rezultati analize kvalitativnih vrijednosti dobivenih metodom termografije

U istim vremenskim periodima, paralelno sa DIC metodom, snimane su i termografske snimke te su one prikazane na slici 40.



Slika 40. Termografski prikaz formiranja i propagacije višestrukih PLC linija

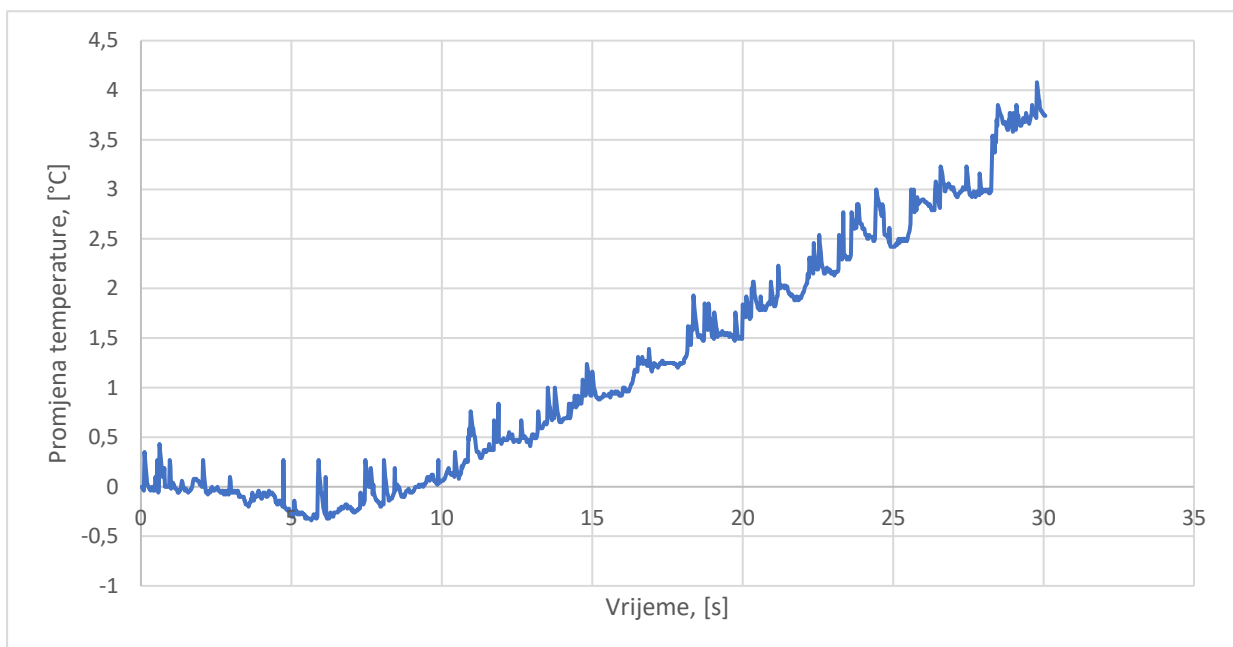
Termografskom analizom vrlo teško se uočavaju same linije, no usporedbom s DIC analizom u istim vremenima moguća je usporedba. Do nemogućnosti jasnog raspoznavanja samih linija dolazi zbog vrlo niskih temperaturnih promjena koje se odvijaju tijekom formiranja i propagacije same linije. To će se jasnije vidjeti iz kvantitativne analize. Kvalitativna termografska analiza, slika 40, prikazuje kako se i ovom metodom uočavaju lokalizacije deformacije koje se odvijaju tijekom PLC efekta. Ponajveći problem tijekom ovakve analize predstavlja što je za jasnije uočavanje potrebno za svaku liniju koja se formira uzimati novo



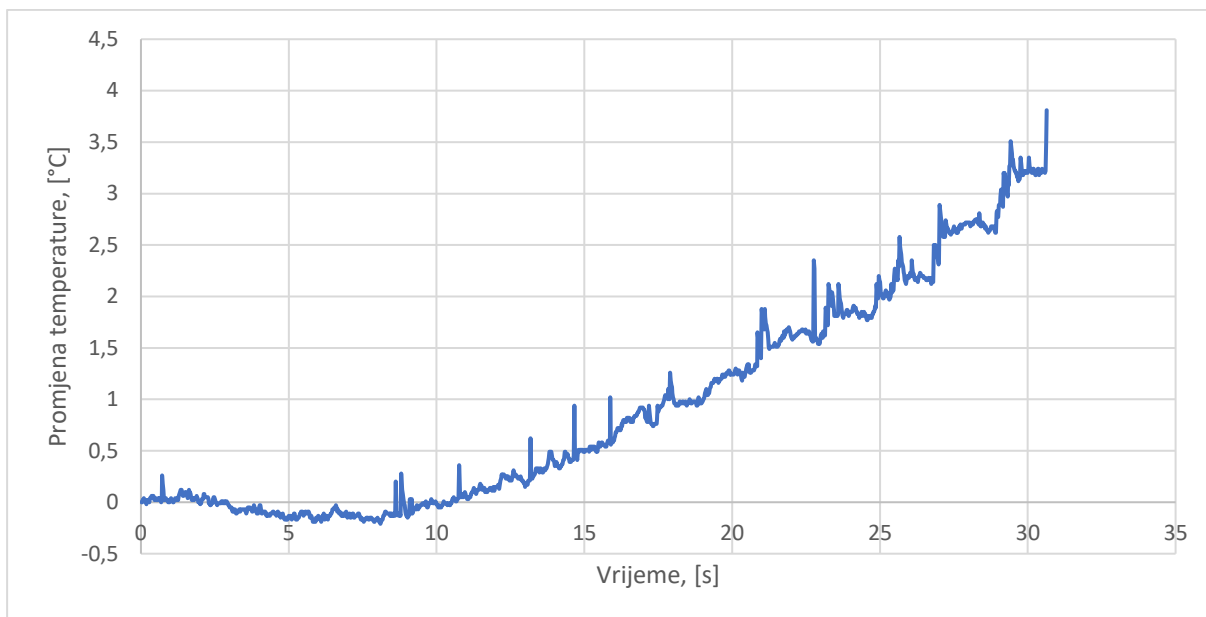
početno stanje, od kojeg se onda počinje pratiti temperaturna promjena. Ovo se jasno vidi iz usporedbe slika u trenucima  $t_4$ ,  $t_5$  i  $t_6$ , slika 40. Formirana linija koja je propagirala duž ispitnog dijela uzorka u  $t_4$  podignula je temperaturu cijelog ispitnog dijela za određeni iznos. Naknadnom analizom kvantitativnih vrijednosti će se utvrditi taj iznos. Kako bi termografskom analizom prikazali formiranje i propagaciju iduće linije, netom poslije trenutka  $t_4$  uzima se početno stanje  $t_5$ . U tom trenutku se uzima da je to početno stanje i temperaturna promjena je  $0^\circ\text{C}$ . Nakon toga se tek može uočiti formiranje linije u trenutku  $t_6$  i njena daljnja propagacija.

#### 5.4. Rezultati analize kvantitativnih vrijednosti dobivenih metodom termografije

Detaljnijom analizom kvantitativnih vrijednosti dobiveni su dijagrami temperaturne promjene, slikama 41 i 42, dana su dva primjera dobivenih dijagrama promjene temperature tijekom plastične deformacije ispitivane legure AlMg4,5.



Slika 41. Dijagram promjene temperature tijekom statičkog vlačnog deformiranja ispitivane legure AlMg4,5, primjer 1



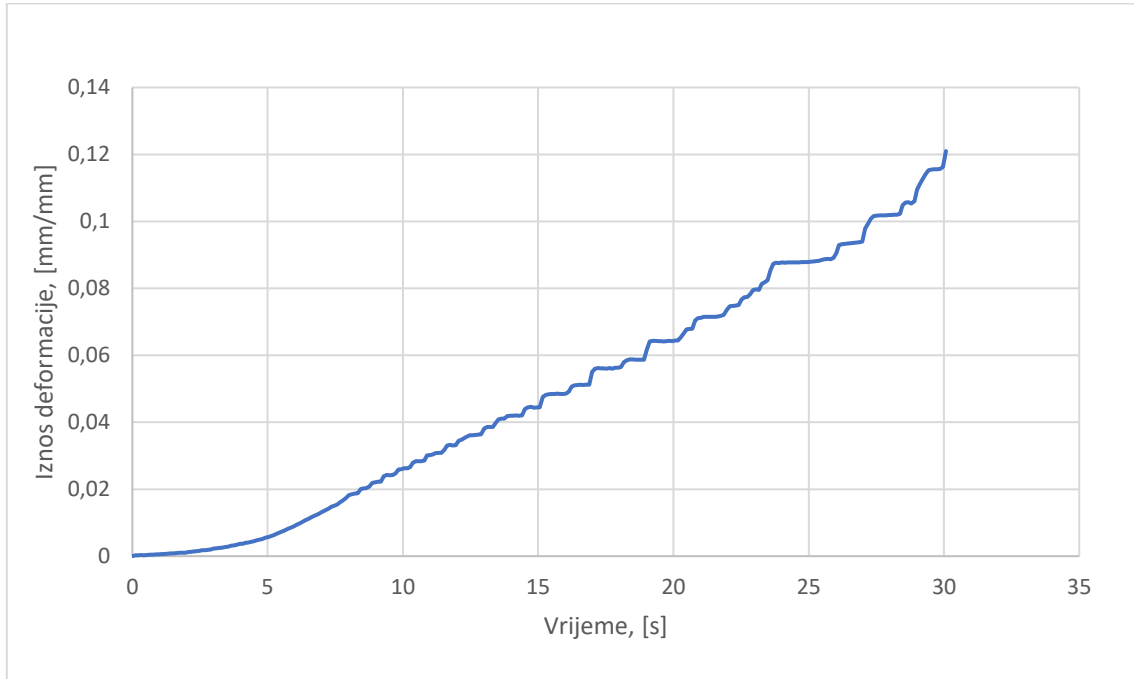
Slika 42. Dijagram promjene temperature tijekom statičkog vlačnog deformiranja ispitivane legure AlMg4,5, primjer 2

Termografska analiza ukazuje kako u prvom dijelu dolazi do poznate pojave termoelastičnog efekta tijekom čega dolazi do pada u temperaturi uzoraka. To je u literaturi [63-65] pojašnjeno kao pojava gdje pod djelovanjem sila dolazi do promjene u temperaturi.

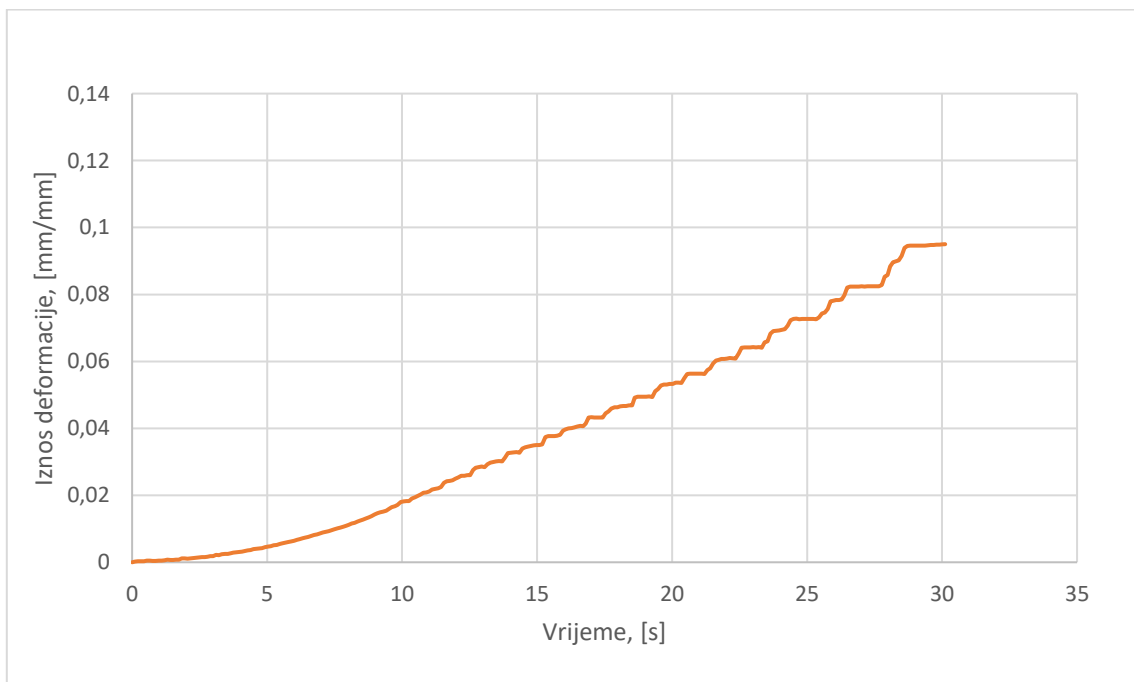
Navedena je pojava tijekom elastične deformacije. Nakon toga slijedi porast u promjeni temperature, koji nije linearan niti eksponencijalna funkcija. Uočljivo je da je taj porast skokovite prirode te u određenim trenutcima bilježi se značajan porast u temperaturi. Nakon toga porast stagnira i temperatura je skoro konstantna, nakon čega slijedi ponovni skokoviti porast te tako tijekom cijelog perioda deformacije. Usporedbom navedenih skokova s dijagrama na slici 41 i 42, uočava se kako su ti skokovi reda veličine od 0,2 do 0,25 °C te se nakon toga javlja zastoj prije nego temperatura poraste za isti iznos.

## 5.5. Rezultati analize kvantitativnih vrijednosti dobivenih metodom digitalne korelacije slike (DIC)

Detaljnijom analizom kvantitativnih vrijednosti dobiveni su dijagrami ukupne deformacije dobiveni DIC metodom slikama 43 i 44, dana su dva primjera dobivenih dijagrama ukupne deformacije ispitivane legure AlMg4,5.



Slika 43. Ukupna deformacija DIC analizom primjer 1

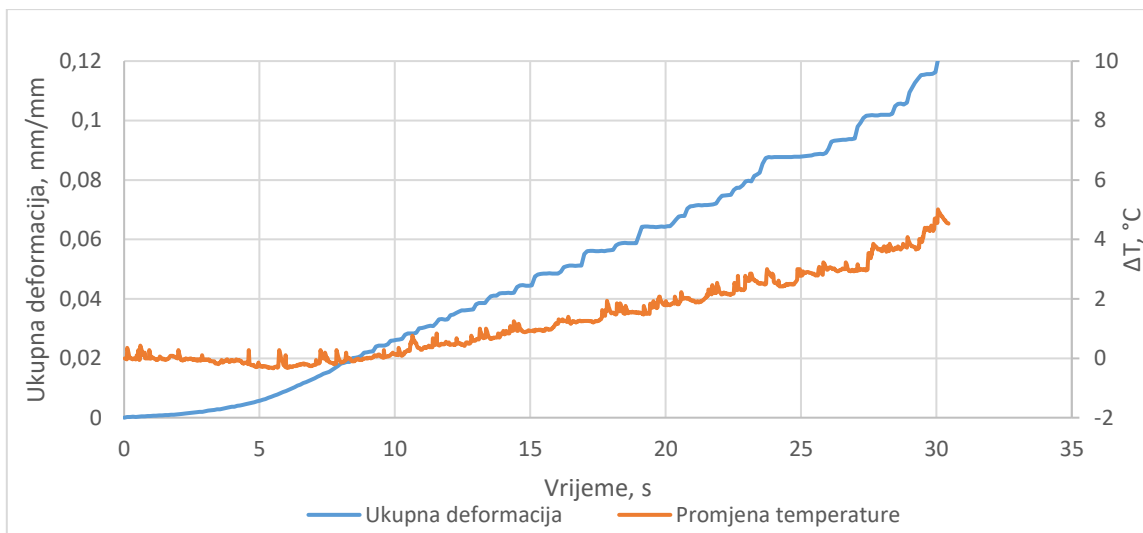


Slika 44. ukupna deformacija DIC analizom primjer 2

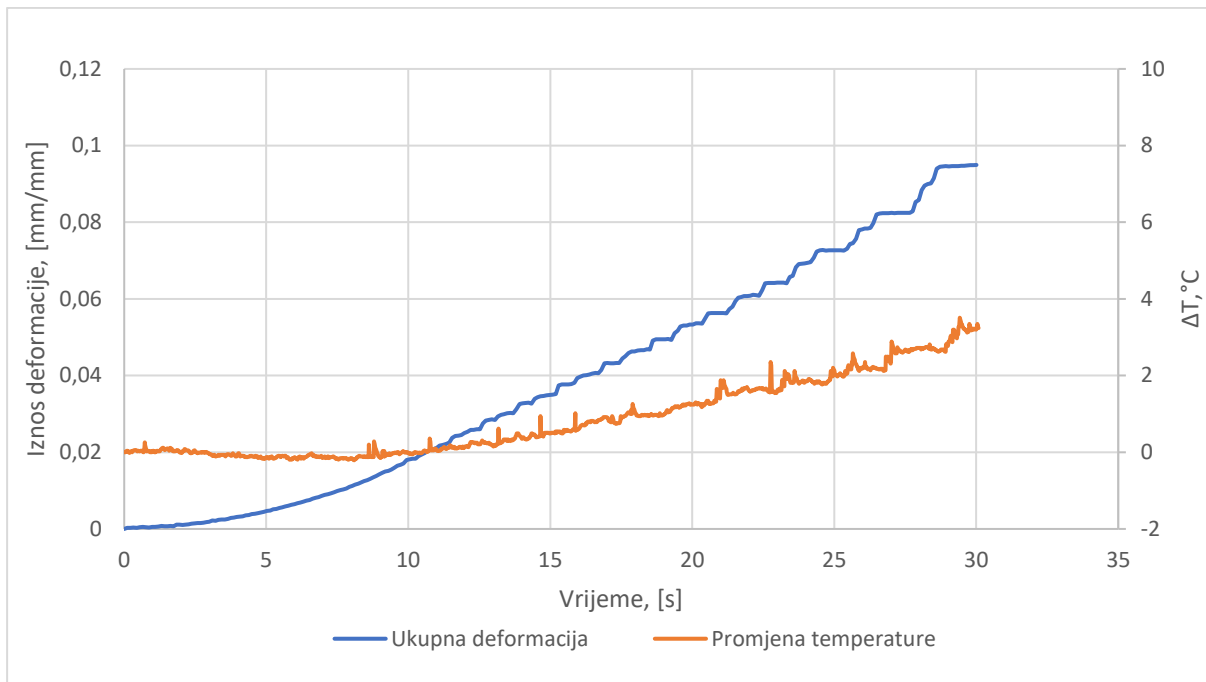
DIC analiza ukupne deformacije tijekom statičkog vlačnog razvlačenja uzoraka ispitivane legure također pokazuje skokovite promjene u deformaciji. Detaljnijom analizom dobivenih dijagrama nije moguće utvrditi točan iznos svake promjene u deformaciji. Ovisno od linije do linije postoje razlike u skokovima u deformaciji i nije moguće definirati neku srednju vrijednost koja bi predstavljala iznos deformacije svake pojedine linije.

## 5.6. Rezultati usporedne analize dijagrama dobivenih DIC i termografskom analizom

Kako bi se ustanovilo radi li se o povezanim promjenama, odnosno da li je promjena deformacije povezana i s temperaturnim promjenama, konstruirani su usporedni dijagrami promjene temperature i deformacije za proučavana dva primjera, a oni su prikazani na slikama 45 i 46.



Slika 45. Usporedni dijagram temperaturene promjene i DIC analize deformacije primjer 1



Slika 46. Usporedni dijagram temperaturene promjene i DIC analize deformacije primjer 2

Usporedne analize dijagrama dobivenih DIC i termografskom analizom pokazuju kako su skokovite promjene povezane. Točnije, uslijed skokovite promjene u deformaciji dolazi i do skokovite promjene u temperaturi. No pitanje koje se može postaviti je uslijed čega dolazi do uočenih skokova u porastu jedne i druge vrijednosti.

U literaturi [65-67] povezuju nastale promjene sa nehomogenom deformacijom uzoraka. Slično ovim promjenama, istraživanja pojave Ludersovih linija, pojašnjavaju kako do lokalizacije deformacija dolazi uslijed postupnog očvršćivanja materijala. Točnije, uslijed prisutnosti precipitata, odnosno prepreka kretanju dislokacija, dolazi do nakupljanja energije, što se očituje kao porast naprezanja. Kada naprezanje dostigne dovoljne iznose, dolazi do lokalizirane deformacije koja očvršćuje materijal, te postupno prelazi duž uzorka postupno provodeći deformaciju duž njega.

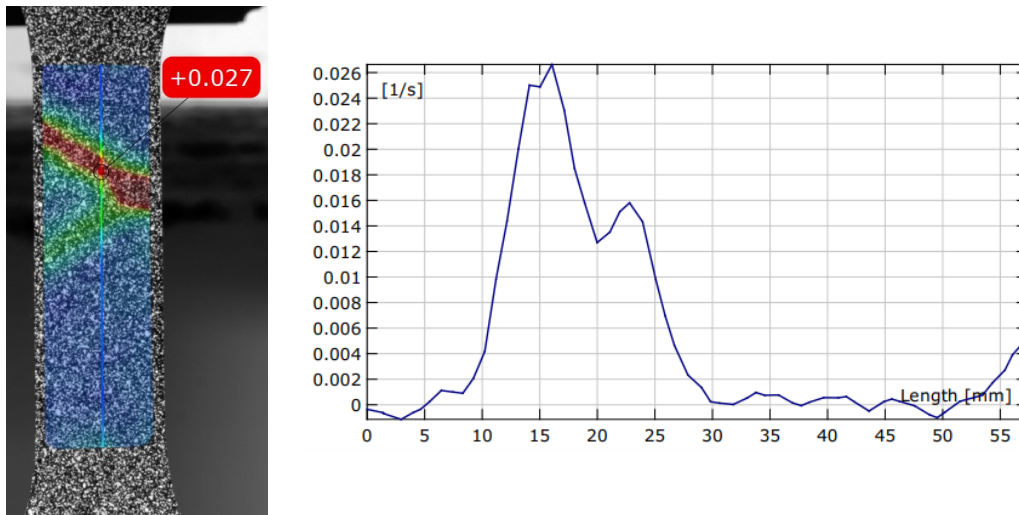
No u slučaju Ludersovih linija, javlja se jedna ili eventualno dvije linije, koje kada deformiraju komad za određeni iznos, dalje ne generiraju nove linije. Kod materijala s PLC efektom, linije se generiraju tijekom cijelog procesa deformacije. Ono što se uočava na svim dijagramima dobivenim statičkim vlačnim pokusom, termografijom i metodom digitalne korelacije slike, pojava linija je u početku plastične deformacije, te se nove linije generiraju sve do loma uzorka.

## 5.7. Rezultati ispitivanja mikrostrukture u trenutku nastajanja PLC linije

Kako bi se analiziralo što se točno odvija na samoj liniji u početku generiranja prve linije, napravljen je dodatni eksperiment. Prethodnim istraživanjima određen je okvirno trenutak kada dolazi do formiranja prve linije.

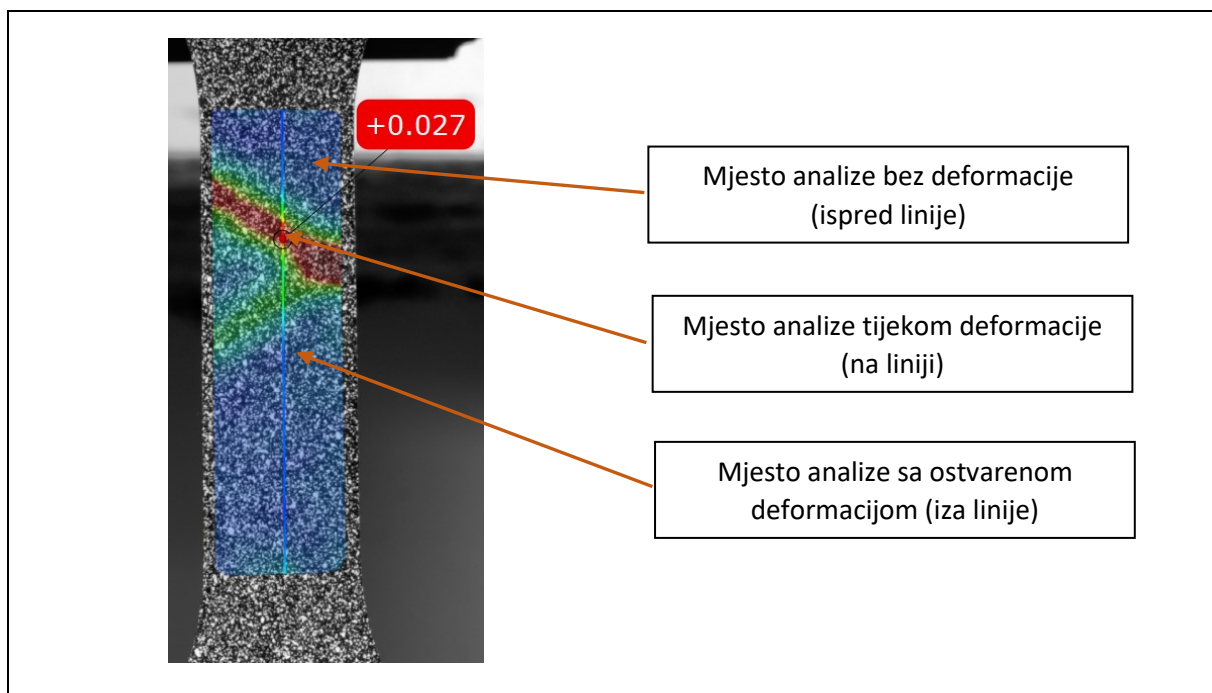
Eksperiment je proveden na način da se odmah po generiranju prve linije zaustavi daljnja deformacija uzorka. Na uzorku je provedeno snimanje mikrostrukture kako bi se vidio mehanizam deformacije i što se događa sa mikrostrukturom na samoj liniji i iza nje.

Kako bi to uspjeli prvo je počelo snimanje termografskom kamerom, gdje se pratila promjena temperature u realnom vremenu. Također je snimana deformacija i optičkom kamerom. U trenutku pojave prve pozitivne promjene temperature uzoraka, snimanih termalnom kamerom, zaustavljeno je daljnje razvlačenje uzoraka. Naknadno se lokacija linije odredila DIC metodom, što je prikazano na slici 47.



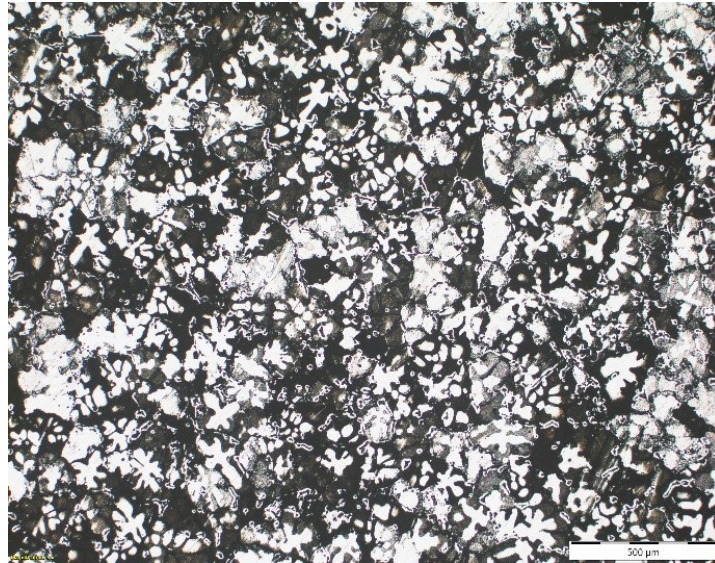
Slika 47. Određivanje mjesta linije nakon zaustavljanja DIC metodom

Usljed prethodne kalibracije te poznavanja mjesta postavljanja linije za analizu, moguće je sa sigurnošću odrediti udaljenosti na kojoj se pojavila linija tijekom eksperimenta. Iz tog dijela uzet je uzorak za strukturnu analizu prema slici 48.

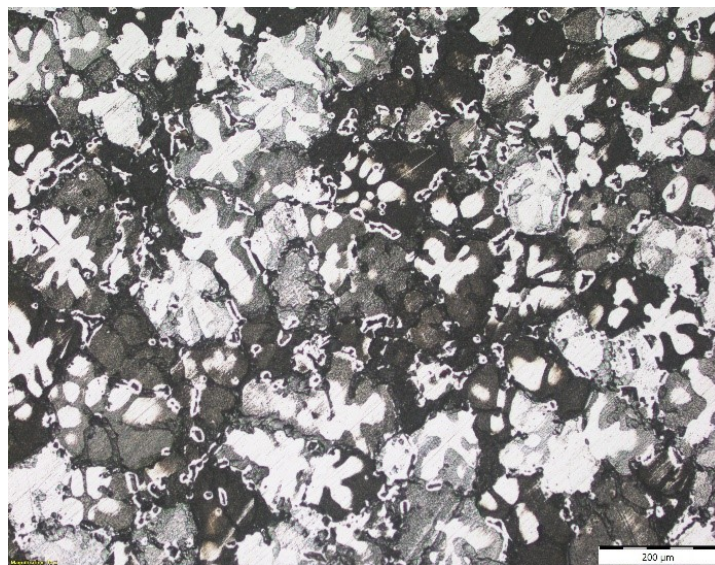


Slika 48. Pozicije snimanja strukturnih snimki

Na navedenim pozicijama snimljene su mikrostrukture ispitivanog uzroka pri različitim povećanjima. Ispred početne linije koja se formirala snimljeno je početno stanje mikrostrukture prije deformacije, što je prikazano na slikama 49 i 50.

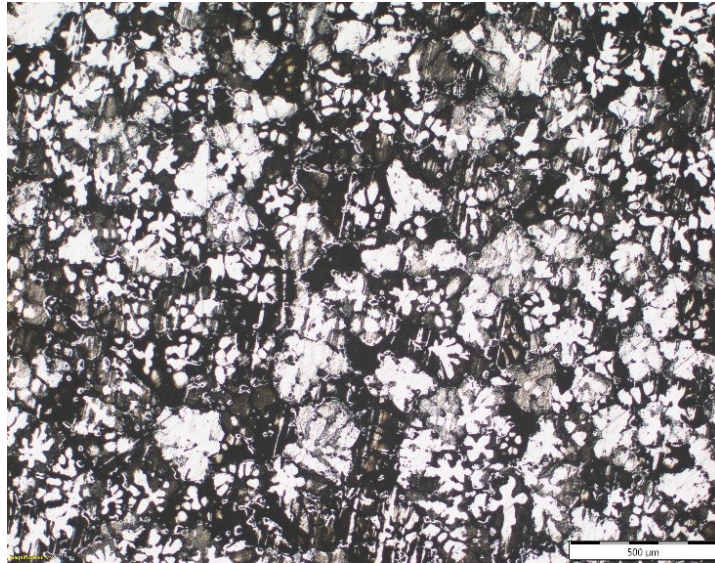


Slika 49. početna mikrostruktura AlMg4,5 legure pri povećanju 50 x



Slika 50. početno mikrostruktura AlMg4,5 legure pri povećanju 100 x

Mikrostruktura pokazuje lijevanu strukturu, različito orijentiranih zrna. Kako bi ustanovili koje promjene nastaju tijekom propagacije PLC linije, snimljena je mikrostruktura na samoj fronti linije pri različitim uvećanjima, što je prikazano na slikama 51 i 52.



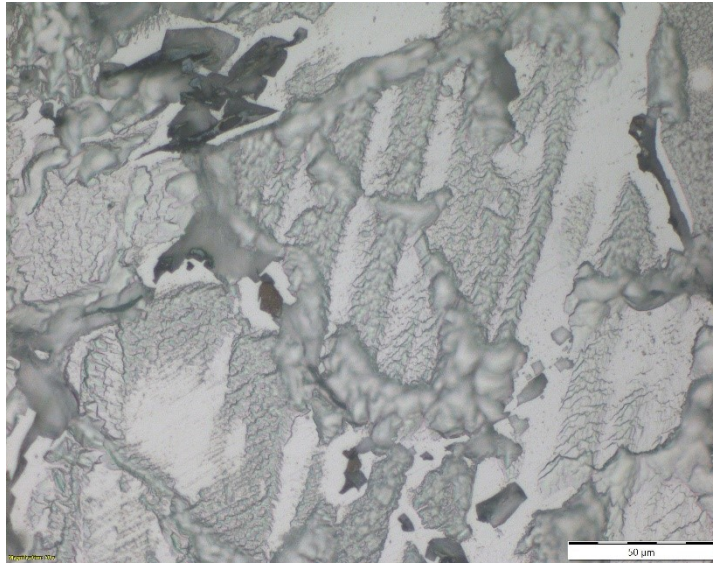
Slika 51. Mikrostruktura AlMg<sub>4,5</sub> legure na PLC liniji pri povećanju 50 x



Slika 52. Mikrostruktura AlMg<sub>4,5</sub> legure na PLC liniji pri povećanju 200x

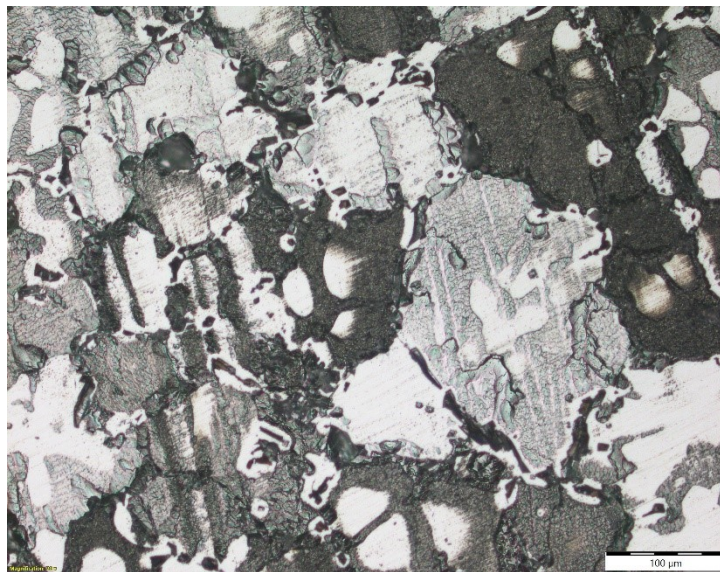
Pri oba povećanja, jasno je vidljivo kako na samoj fronti linije dolazi do značajne deformacije zrna. Ona se reorijentiraju u smjeru razvlačenja i jasno su vidljive linije deformacije. Iz snimljenih mikrostruktura uočava se kako se deformacija provodi mehanizmom translacijskog klizanja. To dokazuju i linije klizanja vidljive na mikrostrukturi same PLC fronte pod povećanjem od 500x, što je prikazano na slici 53.



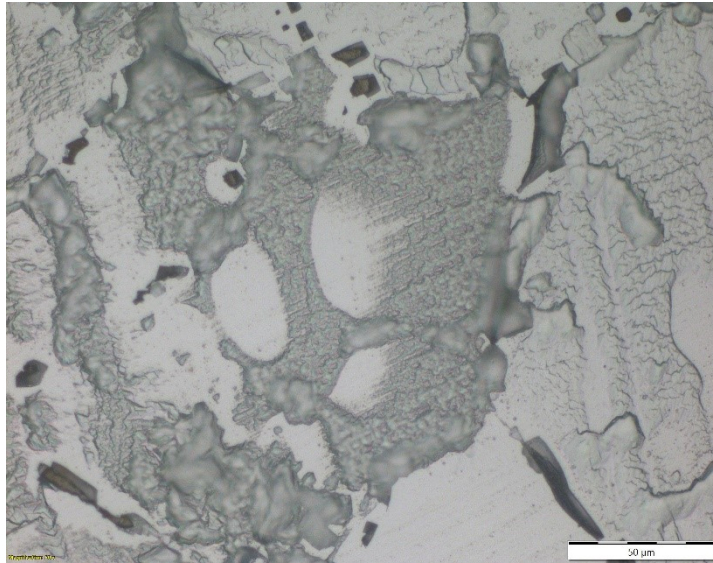


Slika 53. Mikrostruktura AlMg<sub>4,5</sub> legure na PLC liniji pri povećanju 500x

Iza same fronte ostaje deformirano stanje koje je vrlo slično na samoj fronti, što je prikazano na slikama 54 i 55.



Slika 54. Mikrostruktura AlMg<sub>4,5</sub> legure nakon prolaska PLC linije pri povećanju 200x



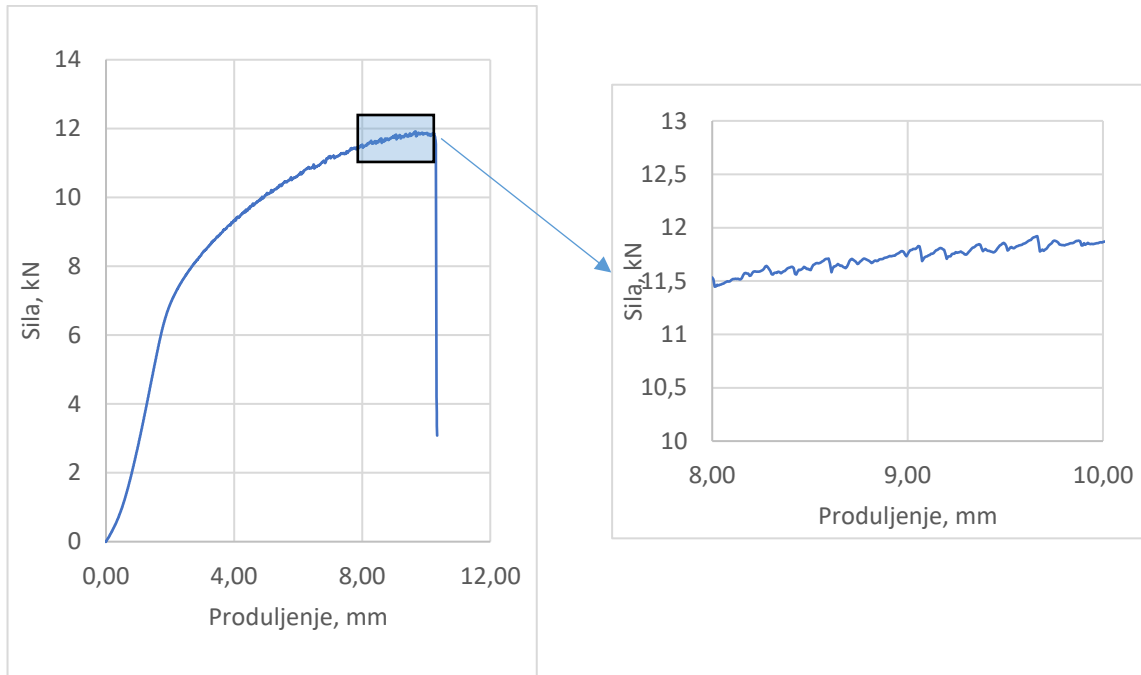
Slika 55. Mikrostruktura AlMg<sub>4,5</sub> legure nakon prolaska PLC linije pri povećanju 500x

Iz snimljenih mikrostruktura nakon prolaska prve PLC linije, vidi se kako ostaje deformirana struktura s jasno uočenim linijama klizanja. Ako se uzme smjer nanošenja glavnog opterećenja pri statičkom vlačnom pokusu, može se reći da su linije klizanja vidljive na mikrostrukturi približno pod kutom od 45 ° u odnosu na smjer razvlačenja. To je i očekivano obzirom na općepoznatu teoriju deformacije translacijskim klizanjem.

No kako je iza linije struktura gotovo identična strukturi na samoj liniji, i dalje nije jasno što pokreće mehanizme stvaranja novih linija tijekom daljnje deformacije.

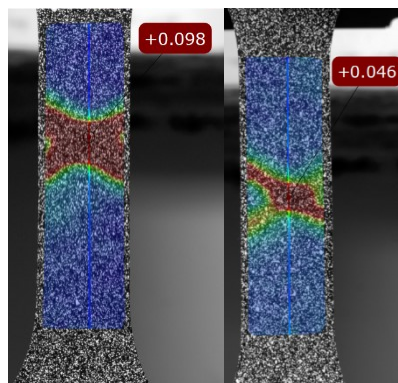
U istraživanjima [68-70] Ludersovih linija na niskougličnim čelicima, slični su se mehanizmi uočili, pri čemu su linije postupno lokalizirano deformirale uzorak. Nakon početne deformacije, na uzorcima se dalje nastavljala uobičajena deformacija u centralnom djelu sve do pojave vrata i loma uzoraka.

Ako se bolje prouči dijagram sila-produljenje ispitivane legure, nije moguće jasno odrediti mjesto početka lokalizacije deformacije, točnije iz dijagrama se ne vidi pojava vrata na uzorcima, što je prikazano na slici 56.



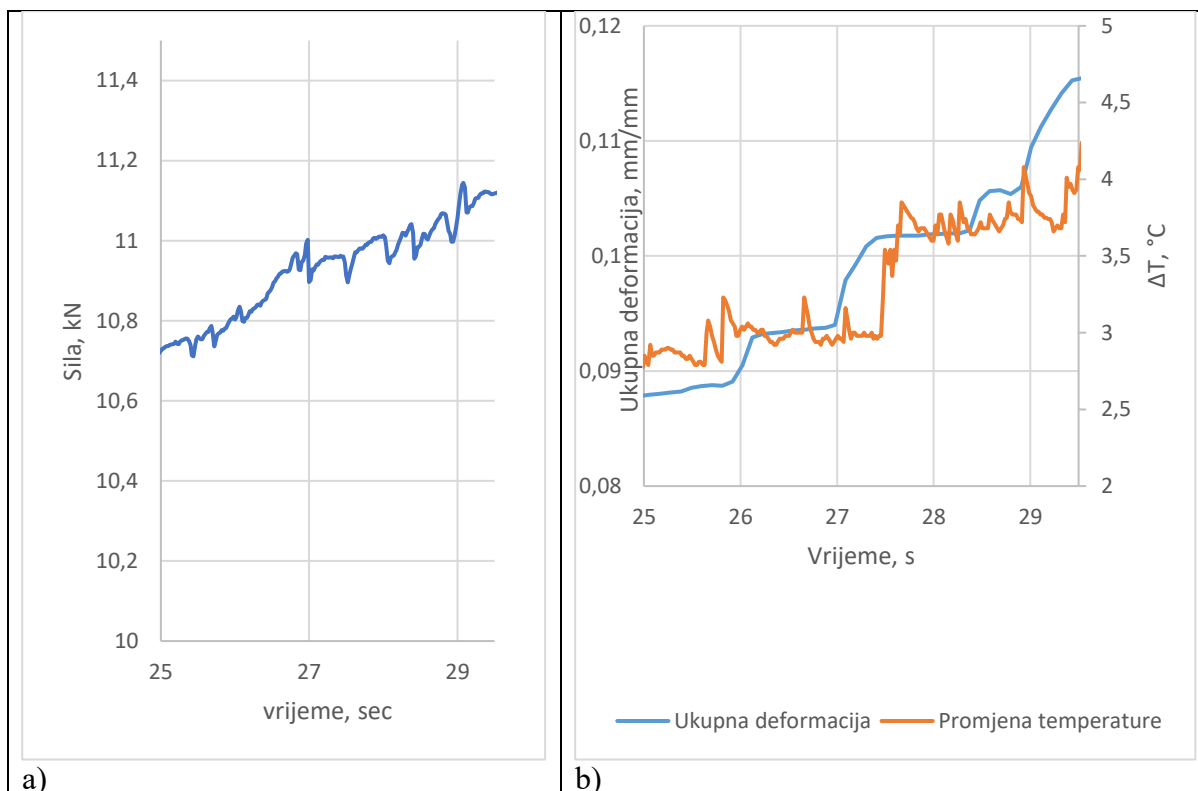
Slika 56. Dijagram sila-produljenje s uvećanim segmentom

Tijekom cijelog područja deformacije imamo konstantno generiranje novih linija te kako se primičemo mjestu loma formira se sve više linija te u pojedinim slučajevima prije loma dolazi do istovremenog formiranja višestrukih linija, što je prikazano na slici 57.



Slika 57. DIC prikaz formiranja višestrukih linija istovremeno

Usporedbom dijagrama dobivenih statičkim vlačnim pokusom, termografskom analizom i DIC analizom, slika 54, mogu se dati opažanja oko principa formiranja prvih PLC linija kod istraživane legure AlMg4,5.



Slika 58. Usporedba analize rezultata mjerenja a) Segment dijagrama sila u vremenu ispitivanja i b) Segment promjene temperature i ostvarene deformacije dobivenih DIC analizom i termografijom

Iz rezultata analiza svih triju metoda, vidljivo je kako su sve promjene, kako u naprezanju, tako i temperaturne promjene i iznosi ostvarene deformacije međusobno povezane. Pri tome se može vidjeti da uslijed porasta naprezanja, slika 54 a) u trenutku 27 sekunde testa na dijagramu naprezanje vrijeme, dolazi do skokovite promjene u deformaciji i pri tome je vizualno zamijećena formacija linije. Uslijed ostvarene deformacije dolazi do pada u iznosu sile, te istovremeno do skoka u temperaturi, što se vidi iz termografske analize. Ako uzmemo u obzir teoriju dislokacija i njihovog gibanja, tijekom deformacije dislokacije zastaju, uslijed čega dolazi do nagomilavanja naprezanja. To se vidi u porastu sile na statičkom vlačnom pokusu. Pri dostizanju kritične vrijednosti naprezanja, dislokacije se pokreću, dolazi do rasterećenja u materijalu i ostvaruje se određena deformacija, što za posljedicu ima porast temperature. U tom periodu dolazi do formiranja i propagacije linije. Nakon toga ponovno dolazi do porasta u naprezanju i ciklus se ponavlja.

Ovo se sukcesivno odvija i tijekom toga postepeno se uzorak očvršćuje kroz svaki ciklus. Ukupno gledajući imamo konstantno ojačanje i porast deformacije i temperature. No za razliku od kontinuiranog porasta kod drugih legura, u slučaju legure sa PLC efektom to je ciklički korak po korak sve dok se ne dostigne kritična deformacija i ojačanje koji izazivaju lom materijala.

## 6. ZAKLJUČAK

Provedenim ispitivanjima metodama statičkog vlačnog pokusa, termografije i digitalne korelacije slike na leguri AlMg4,5 i njihovom analizom moguće je izvesti slijedeće zaključke:

Rezultati statičnog vlačnog ispitivanja ukazuju kako se radi o leguri vlačne čvrstoće 185 do 200 MPa s izduženjem od 9 do 10 %. Na snimljenim dijagramima sila-produljenje jasno su uočljive nestabilnosti tijekom statičnog vlačnog istezanja, te se povezuju s prisutnošću PLC efekta.

Rezultati termografske i DIC analize potvrđuju prisutnost PLC efekta kod ispitivane legure. U početku razvlačenja uzoraka zabilježeno je formiranje jedne linije koja propagira duž ispitnog dijela uzorka, nakon čega dolazi do formiranja nove linije i ponovnog procesa, sve do loma uzoraka. Pri višim iznosima deformacije uočava se formiranje višestrukih linija istovremeno.

Kvantitativna termografska analiza pokazuje kako tijekom deformacije porast u temperaturi ima određene skokovite promjene koje su reda veličine od 0,2 do 0,25 °C, te se to nastavlja duž cijelog procesa deformacije uz maksimalne iznose pri lomu 3,5 do 4 °C.

Kvantitativna DIC analiza također pokazuje oscilacije u prirastu deformacije. Usporedbom s rezultatima termografije može se jasno vidjeti međusobna povezanost ovih oscilacija u porastu temperature i deformacije, odnosno da uslijed skokovite promjene u deformaciji dolazi i do skokovite promjene u temperaturi.

Analizom skokovitih promjena u naprezanju, temperaturi i deformaciji tijekom istezanja uzoraka, može se zaključiti da tijekom formiranja PLC linije postupno dolazi do porasta u naprezanju, gdje pri dostizanju pika naprezanja krene skokovita promjena u deformaciji. Prema teoriji dislokacija, tijekom deformacije dislokacije se zaustavljaju, te uslijed zaustavljanja dolazi do nagomilavanja naprezanja. Kada se dostigne kritična vrijednost naprezanja, dislokacije se pokreću te dolazi do rasterećenja u materijalu i ostvarenja deformacije. Uslijed naglog skoka deformacije dolazi do pika u porastu temperature. Tijekom propagacije duž ispitnog dijela uzorka deformacija se postupno povećava, dok je temperatura skoro konstantna te dolazi do pada u naprezanju. Pri formiranju nove linije ponavlja se cijeli proces, porast naprezanja, skokovita primjena deformacije i temperature nakon čega slijedi pad naprezanja i tako sve do loma uzorka.

Rezultati ispitivanja mikrostrukture pokazuju da mikrostruktura ispod početne PLC linije pokazuje lijevanu strukturu, različito orijentiranih zrna. Struktura na samoj liniji fronte pokazuje da dolazi do značajne deformacije zrna te se ona reorijentiraju u smjeru razvlačenja.

Na deformiranom području iza PLC linije i na samoj PLC liniji jasno su uočljive dislokacije, koje nisu primijećene u nedeformiranom području uzoraka. Također može se zaključiti kako se proces deformacije kod promatrane legure provodi mehanizmom translacijskog klizanja.

## 7. LITERATURA

1. J.R. Davis, Alloying: Understanding the Basics – Aluminum and Aluminum alloys, ASM International, SAD, 2001.
2. H. Halim, The Portevin-Le Chatelier Effect and Shear Band Formation in AA 5754 Aluminum Alloy, Master's thesis, McMaster University, Hamilton, Ontario, 2006.
3. E. Rizzi, P. Hahner, On the Portevin-Le Chatelier effect: theoretical modeling and numerical results, International Journal of Plasticity, Vol 20, 2004, 121-165.
4. T. Mäkinen, Portevin-Le Chatelier effect in an aluminum alloy, Master's thesis, Aalto University, School of Science, Espoo, 2016.
5. Alloy digest data on world wide metals and alloys, Upper Montclair N.J., Engineering Alloys Digest, 1953.
6. G.E. Totten, D.S. MacKenzie, Handbook of Aluminum: Volume 2: Alloy production and materials manufacturing. New York, CRC Press, 2003.
7. <https://www.ggspdt.com/42a-metals-and-metallic-alloys.html> ( 20.6.2022.)
8. <https://www.amazon.in/Diamond-Aluminum-Kitchen-50-Guaranteed/dp/B08L113KHC> ( 20.6.2022)
9. J.G. Kaufman, E.L. Rooy, Aluminium Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications, American Foundry Society, Materials Park, USA, 2004.
10. P. Fusheng, High Plasticity Magnesium Alloys, Chongqing University, 2022.
11. S. Rešković, Teorija Oblikovanja Deformiranjem, Metalurški fakultet, Sisak, 2014.
12. M. Pfeifer, Mechanisms for strengthening Aluminum, Industrial Metallurgist, LLC, Northbrook, 2022.
13. A.G. Kostyryzhev, Strengthening Mechanisms in Metallic Materials, Metals 2021, 11, 1134, 1-5.
14. [https://material.karlov.mff.cuni.cz/people/smilauerova/vyuka/FyzMat\\_I/FyzMat\\_I\\_3\\_dislocations.pdf](https://material.karlov.mff.cuni.cz/people/smilauerova/vyuka/FyzMat_I/FyzMat_I_3_dislocations.pdf) (25.6.2022.)
15. D. Hull, D.J. Bacon, Introduction to Dislocations, Fifth Edition, Department of Engineering, Materials Science and Engineering, University of Liverpool, Liverpool, UK, 2011.
16. <https://www.easyatm.com.tw/wiki/%E4%BD%8D%E9%8C%AF%E5%A2%9E%E6%AE%96%E6%A9%9F%E5%88%B6> (25.6.2022.)
17. J.C. Toledano, Physical Basis of Plasticity in Solids, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapur, 2012.
18. R. Faulkner, J. Martin, Dislocation Theory for Engineers: Worked Examples, IOM Communications Ltd, London, UK, 2000.
19. <https://www.intechopen.com/chapters/65744> (26.7.2022.)
20. H. Chandler, Metallurgy for the Non-Metallurgist, ASM International, Fourth printing, Ohio, SAD, 2006.
21. F. Klocke, Manufacturing Processes 4, Forming, Springer, Aachen, Njemačka, 2006.
22. C. Faciu, Multiscale Modelling in Sheet Metal Forming, Modelling the Portevin- Le Chatelier Effect-A Study on Plastic Instabilities and Pattern Formation, Springer, Cham, 2016. 351-403.
23. A. Sarkar, P. Barat, P. Mukherjee, S Bandyopadhyay, Scaling Behavior of Portevin- Le Chatelier Effect, Indian Institute of Science, Bangalore, 2006
24. S. Tamimi, A. Andrade-Campos, J. Pinho de Cruz, Modelling the Portevin-Le Chatelier effects in aluminum alloys: a review, Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 24 (3-4), 2015, 67-78.

25. A. Yilmaz, The Portevin-Le Chatelier effect: a review of experimental findings, *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol 12, 2011.
26. A. Chatterjee, N. Gayathri, A.Sarkar, P. Mukherjee, P.Barat, Effective dimensionality of the Portevin-Le Chatelier effect, *Philosophical magazine letters* 90.3 (2010), 149-157
27. M. Lebyodkin, L. Dunin-Barkowski, Y. Brechet, Y. Estrin, Spatio-temporal dynamics of the Portevin-Le Chatelier effect: Experiment and modeling, *Acta Materialia* 48(10), 2000., 2529-2541.
28. H. Halim, D.S. Wilkinson, M. Miewicz, The Portevin-Le Chatelier effect and shear band formation in an AA5754 Alloy, *Acta Materialia*, Volume 55, Issue 12, 2007, 4151-4160.
29. L.P. Kubin, K. Chihab, A critical analysis of the serrated flow of Portevin-Le Chatelier Effect, *Department de Physique, Universite de Bejala, Algeria*, 2000.
30. J. Xu, B. Holmedal, O. Sture Hopperstad, T. Manik, K. Marthinsen, Dynamic strain ageing in an AlMg alloy at different strain rates and temperatures: Experiments and constitutive modelling, *International Journal of Plasticity*, Vol 151, 2022,
31. P. Hahner, E. Rizzi, On the kinematics of Portevin-Le Chatelier bands: theoretical and numerical modelling, *Acta Materialia* 51(12), 2003. , 3385-3397.
32. B. Grzegorzczuk, S. Ozigowicz Wojciech, E. Kalinowka-Ozigowicz, A. Kowalski, Investigation of the Portevin-Le Chatelier effect by the acoustic emission, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*
33. T. Bohlke, G. Bondar, Y.Estrin, M.A. Lebyodkin, Geometrically non-linear modeling of the Portevin-Le Chatelier effect, *Computational Materials Science*, Vol. 44, Issue 4, 2009, 1076-1088.
34. P.G. McCormick, C.P. Ling, Numerical modelling of the Portevin-Le Chatelier effect, *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol 43, Issue 5, 1995, 1969-1977.
35. A. Bertram, T. Bohlke, C. Bruggemann, Y. Estrin, Modeling and Simulation of the Portevin- Le Chatelier effect, *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, Vol 6, 2006, 353-354.
36. Z. Chen, Q. Zhang, Z. Jiang, H. Jiang, X. Wu, A Macroscopic Model for the Portevin-Le Chatelier Effect, *Journal of Materials Science and Technology*, Vol 20, Issue 5, 2004. 535-539.
37. S. Kok, A.J. Beaudoin, D.A. Tortorelli, M. Lebyodkin, A finite element model for the Portevin-Le Chatelier effect based on polycrystal plasticity, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 10, No. 6, 2002. 745.
38. P. Zhang, G. Liu, J. Sun, A critical review on the Portevin-Le Chatelier effect in aluminum alloys, *Journal of Central South University*, 2022, 744.766.
39. L.G. Hector, P.D. Zavattieri, Nucleation and Propagation of Portevin-Le Chatelier Bands in Austenitic Steel with Twinning Induced Plasticity, *Experimental and Applied Mechanics*, Volume 6, 2011, 855-863.
40. A. Weidner, A. Muller, H.Biermann, Portevin-Le Chatelier effect in a metastable austenitic CrMnNi steel, *Materials Today: Proceedings* 2S, 2015, 623-626.
41. A.Sarkar, A. Chatterjee, P. Barat, Comparative study of the Portevin-Le Chatelier effect in interstitial and substitutional alloy, *Variable Energy Cyclotron Centre, Kolkata*, 2007.
42. A.Gallardo-Lopez, D. Gomez-Garcia, A. Dominguez-Rodriguez, L.Kubin, Portevin-Le Chatelier effect in Y2O3-ZrO2 single crystals, *Scripta Materialia* 51, 2004, 203-207.
43. L. Chao, J. Teng, Y. Biaobiao, X. Ye, Portevin-Le Chatelier Effect in a Powder Metallurgy Co-Ni-Based Superalloy, *Materials* 15:2796, 2022, 1-10.
44. J.R. Davis, *Tensile testing*, second edition, Materials Park, Ohio, ASM International, 2004.

45. M. Maziere, A. Mortensen, S. Frost, Finite element simulation of the Portevin- Le Chatelier effect in highly reinforced metal matrix composites, *Philosophical Magazine*, Volume 101, 2021, 1471-1489.
46. D.A. Zhemuchuzhnikova, M.A. Lebyodkin, T.A. Lebedkina, R.O. Kaibyshev, The Portevin-Le Chatelier Effect and Kinematics of Deformation Band sin Al-Mg-Sc Alloy: Effect of Grain Size, *Materials Science Forum*, Vol. 879, 2016. 2268-2273.
47. D.A. Zhemchuzhnikova, M.A. Lebyodkin, T.A. Lebedkina, R.O. Kaibyshev, Unusal behavior of the Portevin-Le Chatelier effect in AlMg alloy containing precipitates, *Materials Science and Engineering*, A 639, 2015, 37-41.
48. H.A. Amokhtar, C.Fressengeas, Crossover from continuous propagation in the Portevin-Le Chatelier effect, *Acta Materialia* 58, 2010, 1342-1349.
49. C. Nouara, Experimental characterization of Portevin-Le Chatelier instabilities in Al-2.5% Mg Alloy, *Universite de Bejaia, Bejaia, Algeria*, 2019.
50. J.R. Davis, *Tensile testing*, second edition, Materials Park, Ohio, ASM International, 2004.
51. N. Khlystov, D. Lizardo, K. Matshushita, J. Zheng, *Uniaxial Tension and Compression Testing of Materials*, 3.032 Lab Report
52. S. Rešković, *Ispitivanje materijala*, Metalurški fakultet, Sisak, 2009.
53. S.M. Johnson, *Infrared Thermography and Thermoelastic Stress Analysis of Composite Materials and Structural Systems*, Georgia Institute of Technology, 2006.
54. R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerdiaga, L. Vega, J. Molleda, F.G. Bulnes, *Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing*, *Sensors* 2014,14, 12305-12348.
55. J. Speakman, S. Ward, *Infrared thermography: principles and applications*, *Zoology Analysis of Complex Systems*, Vol 101, 1998, 224-232.
56. M. Niroj Kumar, *Application of Thermography Technique for Assessment and Monitoring of Coal Mine Fire: A Special Reference to Jharia Coal Field, Jharkhand, India*, *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, Vol 2, 2013, 138-147.
57. A. Hedayat, S.Ashur, *Digital Image Correlation and its Application in a n Undergraduate Civil Engineering Materials Laboratory*, Indiana University-Purdue University, Fort Wayne 2015.
58. *Guide for Digital Image Corelation*, 2018.
59. M. Ali Bin Ahmad, K. Subramaniam, M. Ghosn, *Experimental Investigation and Fracture Analysis of Debonding between Concrete and FRP Sheets*, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol 132, Issue 9, 2006.
60. <https://www.gom.com/en/products/gom-suite/gom-correlate-pro> (20.8.2022.)
61. B. Mobasher, *Textile fiber composites: Testing and mechanical behavior*, *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*, Vol 5, Woodhead Publishing, 2016, 101-150.
62. <https://topomatika.hr/proizvodi/softveri/gom-correlate/> (20.8.2022)
63. R. Noguiera de Codes, O. Sture Hopperstad, O. Engler, O.G. Lademo, *Spatial and Temporal Characteristics of Propagating Deformation Band sin AA5182 Alloy at Room Temperature*, *Metallurgical and Materials Transactions A42(11)*, 2011, 3358-3369.
64. N. Ranc, D. Wagner, *Some Aspects of Portevin-Le Chatelier plastic instabilities investigated by infrared pyrometry*, *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, Vol 394 (1-2), 87-95.
65. C.Bernard, J. Coer, H. Laurent, P. Chauvelon, P. Y. Manach, *Relationship between Local Strain Jumps and Temperature Bursts Due to the Portevin-Le Chatelier Effect in an Al-Mg Alloy*, *Experimental Mechanics*, Vol 53, 2014.



66. J.B. Le Cam, E. Robin, L. Letoing, D. Guines, Calorimetric analysis of Portevin-Le Chatelier bands under equibiaxial loading conditions in Al-Mg alloys: Kinematics and mechanical dissipation. *Mechanics of Materials*, Vol 105, 2017. 80-88.
67. A. Baldi, J.M. Considine, S. Quinn, X. Balandraud, Residual Stress, Thermomechanics & Infrared Imaging, Hybrid Techniques and Inverse Problems, Volume 8: Proceedings of the 2017 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, Springer, 2018.
68. T. Brlić, Pojava Ludersovih linija kod niobijem mikrolegiranoga čelika [doktorski rad], Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2020.
69. S. Rešković, I. Jandrlić, F. Vodopivec, Influence of testing rate on Luders band propagation in niobium microalloyed steel. *Metalurgija*, 2016;55(2):157-160.
70. I. Jandrlić, S. Rešković, F. Vodopivec, determining the amount of Luders Band in niobium microalloyed steel. *Metalurgija*, 2016;55(4):631-634.

## **8. ŽIVOTOPIS**

### **OSOBNİ PODACI:**

Ime i prezime: Domagoj Kovačević

Datum i mjesto rođenja: 07.03.1997., Sisak

Adresa: Stjepana Kefelje, 18, 44320, Kutinska Slatina

Broj mobitela: 099/333-0403

E-mail: [domagojkovacevic17@gmail.com](mailto:domagojkovacevic17@gmail.com)

### **OBRAZOVANJE:**

2003. - 2011. Osnovna škola Mate Lovraka, Kutina

2011. - 2015. Tehnička škola Kutina, smjer: kemijski tehničar, Kutina

2016. - 2020. Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet Sisak, redovni preddiplomski studij Metalurgija, smjer: metalurško inženjerstvo.

2020. - Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet Sisak, redovni diplomski studij Metalurgije

### **RADNO ISKUSTVO:**

2021. Plodine d.d., rad preko student servisa

### **VJEŠTINE:**

Rad na računalu: Odlično poznavanje rada na operativnom sustavu Windows, odlično poznavanje rada u programskom paketu MS Office, odlično poznavanje rada na internetu, osnovno poznavanje programa SolidWorks, osnovno poznavanje programa ProCast, osnovno poznavanje programskog jezika C++.

Strani jezik: Engleski jezik

Ostale vještine: vozački ispit – B kategorija