

# Usporedba primjene 2D i 3D digitalne korelacije slike u istraživanju deformacija metalnih materijala

---

Ljiljak, Doris

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:555657>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-26**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Doris Ljiljak

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Doris Ljiljak

USPOREDBA PRIMJENE 2D I 3D DIGITALNE KORELACIJE SLIKE U  
ISTRAŽIVANJU DEFORMACIJA METALNIH MATERIJALA

Voditelji: izv. prof. dr. sc. Ivan Jandrić  
doc. dr. sc. Tin Brlić

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

Članovi povjerenstva za ocjenu i obranu završnog rada:

prof. dr. sc. Ladislav Lazić – predsjednik

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

doc. dr. sc. Tin Brlić – član

prof. dr. sc. Ljerka Slokar Benić – članica

prof. dr. sc. Anita Begić Hadžipašić - članica

doc. dr. sc. Ivana Ivanić – zamjenska članica

Sisak, rujan 2023.

IME: Doris  
PREZIME: Ljiljak  
MATIČNI  
BROJ: BE-3689/20

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

## IZJAVU O IZVORNOSTI

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

USPOREDBA PRIMJENE 2D I 3D DIGITALNE KORELACIJE SLIKE U

ISTRAŽIVANJU DEFORMACIJA METALNIH MATERIJALA

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

Sisak, 08. 09. 2023.

Doris Ljiljak  
(vlastoručni potpis)

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



KLASA: 602-03/23-05/04

URBROJ: 2176-78-23-01- 94

Sisak, 14. lipnja 2023.

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

## ODLUKU

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

#### I.

Studentici sveučilišnog prijediplomskog studija *Metalurgija*, smjer *Industrijska ekologija* u redovitom statusu **DORIS LJILJAK** (0124125228) za suvoditelje završnog rada pod naslovom "Usporedba primjene 2D i 3D digitalne korelacije slike pri istraživanju deformacije metalnih materijala" ("Comparison of 2D and 3D digital image correlation application in the deformation investigation of metallic materials") imenuju se **izv. prof. dr. sc. Ivan Jandrić** i **doc. dr. sc. Tin Brlić**, a za stručnu voditeljicu **Lorena Mrkobrada, mag. ing. met.**

#### II.

Studentici iz točke I. ove Odluke imenuje se Povjerenstvo za ocjenu i obranu završnog rada u sastavu:

1. prof. dr. sc. Ladislav Lazić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – predsjednik,
  2. izv. prof. dr. sc. Ivan Jandrić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – član,
  3. doc. dr. sc. Tin Brlić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – član,
  4. prof. dr. sc. Ljerka Slokar Benić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – članica,
  5. prof. dr. sc. Anita Begić Hadžipašić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – članica.
- Za zamjensku članicu imenuje se doc. dr. sc. Ivana Ivanić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet.

#### III.

Ova Odluka stupa na snagu danom donošenja.

#### IV.

Protiv ove Odluke može se uložiti prigovor Fakultetskom vijeću Metalurškog fakulteta u roku 8 dana od dana primitka iste.

#### Dostavljeno:

- 1 x Doris Ljiljak
- 1 x suvoditeljica, članovi Povjerenstva, stručna voditeljica
- 1 x Studentska referada
- 1 x Tajništvo
- 1 x pismohrana Fakultetskog vijeća
- 1 x pismohrana

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

Vršitelj dužnosti dekana  
Metalurškog fakulteta

prof. dr. sc. Nikola Mrvac



*Lazić*

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

## ZAHVALA

Zahvaljujem svojim voditeljima završnog rada izv.prof.dr.sc. Ivanu Jandrliću te doc.dr.sc Tinu Brliću na pomoći i strpljenju prilikom izrade ovog završnog rada. Također, zahvaljujem stručnoj voditeljici Loreni Mrkobradi, mag.ing.met. na savjetima tijekom provođenja eksperimentalnog dijela. Zahvalna sam na stečenom znanju i iskustvu svim djelatnicima Metalurškog fakulteta u Sisku. Zahvaljujem kolegama na pomoći, podršci i lijepim uspomenama koje će me podsjećati na studentske dane. Posebno bih se zahvalila svojoj obitelji i prijateljima koji su mi pružali najveću podršku tijekom cijelog studiranja.

## SAŽETAK

Upotreba aluminija i njegovih legura je danas gotovo nezaobilazna tema. Poznato je da pojedine legure aluminija pokazuju određeni nehomogeni tok materijala prilikom njihovog oblikovanja plastičnom deformacijom u gotove proizvode, a povezuju se s pojavama Lüdersovih linija i/ili Portevin-Le Chatelier efekta. Prilikom istraživanja ovih pojava danas se uz statički vlačni pokus primjenjuju bezkontaktne metode istraživanja kao što su metoda digitalne korelacije slike i termografija. Napretkom tehnologije napredovale su i metode istraživanja, tako su danas dostupne razne metode digitalne korelacije slike. U ovom završnom radu korištene su 2D i 3D metoda za korelaciju digitalne slike. Istraživanjima su dane usporedbe osjetljivosti dvaju različitih metoda pri praćenju i mjerenju promjena deformacije i brzine deformacije. Iz rezultata kvalitativne i kvantitativne analize zaključeno je kako pri određivanju deformacije nema razlike između korištenih metoda, dok u slučaju mjerenja brzine deformacije postoje određene razlike.

*Ključne riječi: digitalna korelacija slike, 2D DIC, 3D DIC, statičko vlačno ispitivanje, aluminijske legure*

## ABSTRACT

Today, use of aluminum and its alloys is almost unavoidable. It is well known that certain aluminum alloys, during their plastic deformation into finished products, exhibit a certain inhomogeneous flow of material associated with the appearance of Lüders bands and/or the Portevin-Le Chatelier effect. In the study of these phenomena, non-contact investigation methods, such as the digital image correlation and thermography, are used in addition to the static tensile test. The investigation methods have also evolved with the technological progress, so today there are different versions of methods that use digital image correlation. In this work, 2D and 3D methods were used for digital image correlation. The research provided comparison of the sensitivity of two different methods in monitoring and measuring deformation and strain rate changes. From the results of qualitative and quantitative analysis, it was concluded that there is no difference between the systems used in determining deformation, while there are some differences in measuring strain rate.

*Keywords: digital image correlation, 2D DIC, 3D DIC, static tensile testing, aluminum alloys*



## Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. DEFORMACIJSKA SVOJSTVA METALNIH MATERIJALA</b> .....	2
2.1. Naprezanje .....	2
2.2. Mehanizmi plastične deformacije.....	2
2.2.1. Utjecaj kemijskog sastava i strukture kod plastičnosti .....	4
2.2.2. Utjecaj temperature kod plastičnosti .....	4
2.2.3. Utjecaj brzine deformacije na plastičnost.....	4
2.3. Deformacijski otpor.....	4
2.3.1. Utjecaj kemijskog sastava i strukture na deformacijski otpor .....	5
2.3.2. Utjecaj temperature na deformacijski otpor.....	5
2.3.3. Utjecaj brzine deformacije na deformacijski otpor.....	5
<b>3. METODE ISTRAŽIVANJA DEFORMACIJE KOD METALNIH MATERIJALA</b> .....	6
3.1. Statički vlačni pokus.....	6
<b>4. DIC METODA MJERENJA POMAKA I ODREĐIVANJA DEFORMACIJA KOD METALNIH MATERIJALA</b> .....	9
4.1. Važnost pripreme uzorka.....	9
4.2. 2D DIC metoda.....	10
4.3. 3D DIC metode.....	11
4.4. Nehomogene deformacije.....	12
4.4.1. Lüdersove linije .....	13
4.4.2. Portevin-Le Chatelier efekt.....	13
<b>5. USPOREDBE 2D I 3D MJERENJA METODOM DIC</b> .....	15
<b>6. EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....	17
<b>7. REZULTATI I RASPRAVA</b> .....	20
<b>8. ZAKLJUČAK</b> .....	33
<b>LITERATURA</b> .....	34
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	36

## POPIS SLIKA

Slika 1 a) Rubna dislokacija, b) vijčana dislokacija [7].....	3
Slika 2 Prikaz lomova metalnih šipki od krhkog do potpuno duktilnog loma [9].....	3
Slika 3 Utjecaj temperature na plastičnost [1] .....	4
Slika 4 Okrugli poprečni presjek [11].....	6
Slika 5 Pravokutni poprečni presjek [11].....	6
Slika 6 Kidalica za statička ispitivanja do 100 kN [13].....	8
Slika 7 Dijagram sila-produljenje [4] .....	8
Slika 8 Nasumični markeri na uzorku [17] .....	9
Slika 9 Shematski prikaz 2D DIC metode [20] .....	11
Slika 10 Princip rada 3D DIC metode [24].....	12
Slika 11 Lüdersove linije [29].....	13
Slika 12 Nacrt uzorka za ispitivanje .....	17
Slika 13 Pripremljeni uzorak za DIC ispitivanja .....	17
Slika 14 Postavljena oprema za ispitivanje 2D i 3D DIC metodama .....	18
Slika 15 Parametri korelacije za 2D i 3D DIC ispitivanja .....	19
Slika 16 DIC analiza tijekom statičkog vlačnog pokusa: a)analiza deformacije, b) analiza brzine deformacije .....	19
Slika 17 Usporedba DIC prikaza raspodjele deformacije tijekom eksperimenta određenih 2D i 3D DIC metodom.....	20
Slika 18 Usporedba DIC prikaza raspodjele brzine deformacije tijekom eksperimenta određenih 2D i 3D DIC metodom.....	21
Slika 19 Usporedba maksimalnih iznosa ukupne deformacije dobivenih DIC metodama 2D i 3D .....	22
Slika 20 Usporedba maksimalnih iznosa brzina deformacija tijekom eksperimenta dobivenih DIC metodama 2D i 3D .....	23
Slika 21 Usporedba srednjih iznosa deformacija dobivenih DIC metodama 2D i 3D .....	24
Slika 22 Usporedba srednjih iznosa brzina deformacije tijekom eksperimenta određenih 2D i 3D metodom .....	24
Slika 23 Dijagram naprežanje – vrijeme.....	25
Slika 24 Linijska analiza iznosa deformacija po dužini ispitnog uzorka pri 0 sekundi .....	26
Slika 25 Linijska analiza iznosa deformacija po dužini ispitnog uzorka pri 10,3 sekundi .....	26
Slika 26 Linijska analiza iznosa deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 15,7 sekundi .....	27
Slika 27 Linijska analiza iznosa deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 25,95 sekundi .....	27
Slika 28 Linijska analiza iznosa deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 29,75 sekundi .....	28
Slika 29 Linijska analiza iznosa deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 36,15 sekundi .....	28
Slika 30 Linijska analiza iznosa brzine deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 0 sekundi .....	29
Slika 31 Linijska analiza iznosa brzine deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 10,3 sekundi .....	29
Slika 32 Linijska analiza iznosa brzine deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 15,7 sekundi .....	30
Slika 33 Linijska analiza iznosa brzine deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 25,29 sekundi .....	30
Slika 34 Linijska analiza iznosa brzine deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 29,75 sekundi .....	31

Slika 35 Linijska analiza iznosa brzine deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 36,15 sekundi	31
---	----

---

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1 Vrste ispitivanja materijala [10].....	16
Tablica 2 Kemijski sastav ispitivane legure.....	17

## 1. UVOD

Pri karakterizaciji novih ili postojećih materijala vrlo je bitno poznavati ponašanje materijala tijekom plastične deformacije, stoga je često potrebno istražiti tok materijala tijekom deformacije. Sposobnost točnog mjerenja i kvantificiranja deformacija ključna je za razumijevanje načina na koji materijali reagiraju na vanjske sile i opterećenja. Tijekom godina razvijene su različite metode ispitivanja plastičnog toka materijala kako bi se pojasnile deformacije, dajući uvid u ponašanje materijala u različitim uvjetima. Jedna od takvih metoda je digitalna korelacija slike (eng. Digital Image Correlation - DIC), beskontaktna metoda koja je privukla značajnu pozornost zbog mogućnosti određivanja pomaka i iznosa deformacije bez kontakta s materijalom i tijekom cijelog perioda deformacije.

Danas su razvijeni i u primjeni 2D i 3D sustavi koji koriste DIC metodu, od kojih svaki nudi različite prednosti u pogledu prostorne rezolucije i sveobuhvatnosti prikupljanja podataka. U ovom završnom radu provedena je opsežna usporedba primjene 2D i 3D DIC metode u istraživanju deformacija metalnih materijala. Primarni pristup koji se koristi za istraživanje deformacija je statički vlačni pokus, široko prihvaćena metoda koja podvrgava uzorke kontroliranom opterećenju sve dok ne dođe do loma. Eksperimentalni dio ovog istraživanja usredotočen je na uzorke aluminijske legure s različitim primjesama. Deformacije zabilježene DIC metodama povezane su s onima dobivenim iz statičkog vlačnog ispitivanja. Usporedba eksperimentalnih rezultata dobivenih statičkim vlačnim pokusom (kao što su deformacija i pomaci) s rezultatima DIC analize služi za potvrdu točnosti i pouzdanosti DIC metoda u praćenju kompleksnih deformacijskih ponašanja metalnih materijala. U konačnici, ovo istraživanje pridonosi poboljšanju razumijevanja mehanizama deformacije i primjene DIC metoda u znanosti o materijalima i inženjerstvu.

Cilj ovog završnog rada bio je paralelnim korištenjem 2D i 3D DIC metode odrediti deformacije i brzine deformacije te iz njihove usporedbe ustanoviti postoji li razlike između izmjerenih vrijednosti u ovisnosti o korištenoj metodi. Korištena je legura za koju je poznato da ima PLC (eng. Portevin-Le Chatelier) efekt. Tijekom statičkog vlačnog pokusa paralelno su korištene 2D i 3D DIC metoda za analizu pomaka, a naknadna analiza rezultata pokazati će eventualne razlike između korištenih metoda.

## **2. DEFORMACIJSKA SVOJSTVA METALNIH MATERIJALA**

Deformacijska svojstva metala odnose se na njihove promjene oblika i strukture koje se javljaju pod utjecajem vanjskih sila ili opterećenja. Svrha deformacijskog oblikovanja je dobiti željeni oblik i ciljne dimenzije i mehanička svojstva gotovog proizvoda. Plastična deformacija se može provoditi pri sobnoj temperaturi, povišenim ili na visokim temperaturama, pri čemu se uzima da tijekom oblikovanja volumen ostaje konstantan. Kada se koriste vanjske sile za djelovanje na metale i njihove legure, oni će imati reakcijsku silu, koju nazivamo naprezanjem [1].

### **2.1. Naprezanje**

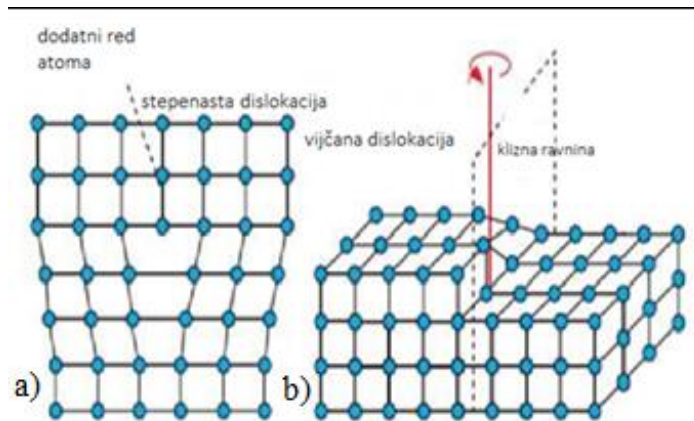
Naprezanje metala je pojam koji se koristi za opisivanje stanja materijala koji je izložen vanjskim silama koje uzrokuju deformaciju ili promjenu oblika metala. Kada je metal podvrgnut takvim silama, dolazi do interakcije između atoma, što rezultira promjenom njegove strukture i svojstava. Naprezanje metala može biti tlačno ili vlačno, ovisno o smjeru primijenjene sile u odnosu na površinu metala. Kada se na metal primijeni sila, javlja se unutarnje naprezanje u materijalu. Naprezanje može biti promjenjivo ili stalno, ovisno o tome je li primijenjena sila konstantna ili se mijenja tijekom vremena. Promjenjivo naprezanje može dovesti do zamora materijala, što znači da materijal s vremenom slabi uslijed ponovljenih naprezanja. Kada je metal podvrgnut naprezanju, dolazi do deformacije materijala koja može biti elastična ili plastična.

Opterećenjem materijala tijekom ispitivanja najprije dolazi do elastične deformacije te ukoliko se primijenjeno opterećenje ukloni, materijal se vraća u svoje prvobitno stanje. Ukoliko se materijal optereti iznad granice elastičnosti, materijal počinje plastično teći, odnosno dolazi do plastične deformacije. U području plastične deformacije, nakon rasterećenja materijala ne dolazi do vraćanja u prvobitno stanje, već materijal zadržava odgovarajuće produljenje [2].

### **2.2. Mehanizmi plastične deformacije**

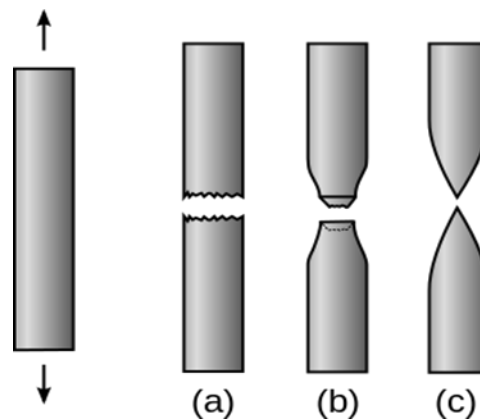
Plastičnost materijala je sposobnost metalnih materijala da podnesu i zadrže deformaciju nakon uklanjanja sile koja je izazvala tu deformaciju. Kod elastične deformacije nakon prestanka djelovanja vanjske sile na materijal, materijal se vraća u svoj izvorni oblik, dok plastična deformacija ostaje trajna. Kada se na metal primijeni dovoljno velika sila, atomska struktura metala počinje mijenjati oblik [3-4]. Atomi se pomiču jedni u odnosu na druge, a te promjene se događaju na mikroskopskoj razini. Dostizanjem kritične vrijednosti naprezanja u metalu dolazi do dva osnovna mehanizma plastične deformacije, poznata kao translacijsko klizanje i sraslanje odnosno dvojnikanje. Kod oba oblika deformacije dolazi do uzajamnog i neprestanog premještanja atoma iz jednog ravnotežnog položaja u drugi [1,4].

Dislokacije su greške u kristalnoj rešetki metala koje se javljaju kao rezultat slaganja atoma tijekom skrućivanja ili uslijed naprezanja u materijalu, te se smatra kako se plastična deformacija metala odvija kretanjem dislokacija. Mogu se podijeliti na rubne dislokacije i vijčane dislokacije, slika 1. Rubna dislokacija se formira kada u kristalnoj rešetki između pravilno poredanih atoma dođe do stvaranja dodatne ravnine, stvarajući brid ili rub u materijalu, dok se vijčana dislokacija formira kada se red atoma u kristalnoj rešetki uvija oko osi dislokacije [5-7], prikazano na slici 1.



Slika 1. a) Rubna dislokacija, b) vijčana dislokacija [7]

Metale možemo karakterizirati prema njihovoj duktilnosti. Za materijale koji mogu podnijeti veću plastičnu deformaciju prije nego što dođe do loma kažemo da su duktilni. Ovo svojstvo je suprotno od krhkosti, gdje materijal ima tendenciju pucanja pri relativno malim deformacijama, slika 2. Materijali koji su visoko duktilni mogu podnijeti značajnu plastičnu deformaciju prije nego što dođe do loma. Izražava se kao postotak izduženja ili smanjenja površine. Metali dobre duktilnosti prikladni su za proizvodnju metalnih ploča ili limova valjanjem ili udaranjem čekićem [8].



Slika 2. Prikaz lomova metalnih šipki od krhkog do potpuno duktilnog loma [9]

Plastičnost metala i legura ovisi o različitim faktorima kao što su kemijski sastav, tipu kristalne strukture, uvjetima deformacije kao što su korištena tehnologija oblikovanja, temperatura i brzina deformacije. Neke vrste metala, poput aluminija, bakra i čelika, imaju visoku plastičnost, što ih čini idealnim za oblikovanje i obradu. S druge strane legure kao što su neke vrste nehrđajućeg čelika, mogu biti manje plastične i zahtijevaju posebne tehnike obrade [1].

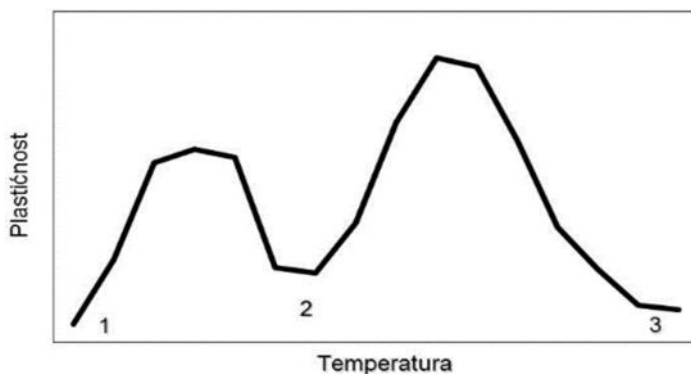
Plastičnost materijala bitno je svojstvo u mnogim industrijskim procesima jer omogućuje fleksibilnost u oblikovanju materijala prema specifičnim potrebama. Važna je i u kontekstu mehaničkog inženjerstva i dizajna konstrukcija. Prilikom dizajniranja komponenti ili struktura od metala, važno je uzeti u obzir njihovu plastičnost kako bi se osigurala dovoljna sigurnost i izbjegli neželjeni lomovi ili deformacije pod utjecajem opterećenja.

### 2.2.1. Utjecaj kemijskog sastava i strukture kod plastičnosti

Kemijski sastav i struktura metala imaju značajan utjecaj na njegovu plastičnost. Čisti metal ima najbolju plastičnost, dok dodavanjem drugih primjesa dolazi do pogoršanja plastičnosti. Primjerice, dodavanjem legirajućih i mikrolegirajućih elemenata mogu nastati različite faze i precipitati, pri čemu se povećava čvrstoća materijala ali, se smanjuje plastičnost. Vrlo su važne i nečistoće u samom materijalu, jer djeluju kao smetnje klizanju kristalnih ravnina i smanjuju sposobnost metala da se plastično deformira [1].

### 2.2.2. Utjecaj temperature kod plastičnosti

Temperatura ima značajan utjecaj na plastičnost metala. Promjena temperature može značajno utjecati na sposobnost metala da se deformira bez loma ili pucanja. Ukoliko se materijal plastično oblikuje iznad temperature rekristalizacije riječ je o toploj plastičnoj deformaciji. Ispod temperature rekristalizacije provodi se hladna plastična deformacija. Tijekom hladne plastične deformacije ne odvija se rekristalizacija i oporavak, što dovodi do povećanja gustoće dislokacija u metalu. Utjecaj temperature na plastičnost materijala prikazan je na slici 3 [1].



Slika 3. Utjecaj temperature na plastičnost [1]

### 2.2.3. Utjecaj brzine deformacije na plastičnost

Brzina deformacije također ima značajan utjecaj na plastičnost metala. Brzina deformacije može utjecati na brzinu i put kojim se dislokacije kreću tijekom deformacije. Na nižim brzinama deformacije, dislokacije imaju više vremena za klizanje i premještanje, što rezultira većom plastičnošću metala. S druge strane, na visokim brzinama deformacije, dislokacije imaju manje vremena za klizanje, što može ograničiti plastičnost metala.

S povećanjem brzine deformacije kod tople plastične deformacije dolazi do smanjenja plastičnosti, jer se visokim brzinama deformacije ne stignu odвити do kraja procesi rekristalizacije i oporavka materijala. Obzirom da se pri sobnoj temperaturi, točnije tijekom hladne plastične deformacije ne odvijaju procesi rekristalizacije, utjecaj brzine deformacije pri hladnoj plastičnoj deformaciji nije toliko izražen [1].

## 2.3. Deformacijski otpor

Deformacijski otpor se odnosi na sposobnost materijala da se odupre promjeni oblika ili deformaciji kada se na njega primjenjuje opterećenje. Deformacijski otpor predstavlja ravnotežu sila unutar materijala kojima se on odupire promjeni oblika. Na deformacijski otpor



također utječu različiti faktori kao što su kemijski sastav, struktura, temperatura, brzina deformacije i stupanj deformacije [1].

### **2.3.1. Utjecaj kemijskog sastava i strukture na deformacijski otpor**

Kemijski sastav metala ima značajan utjecaj na deformacijski otpor. Dodavanje legirajućih elemenata može značajno utjecati na deformacijski otpor metala. Legirajući elementi mogu mijenjati strukturu metala, uključujući veličinu zrna, raspodjelu faza i prisutnost očvrnutih otopina ili precipitata. Tvrde faze mogu značajno povećati deformacijski otpor metala i djeluju kao prepreke klizanju dislokacija te povećavaju deformacijski otpor. Nečistoće prisutne u metalu, kao što su oksidi, sulfidi ili druge nečistoće utječu kao smetnje klizanju dislokacija, dok s druge strane mogu izazvati krtost i mjesta nastajanja loma tijekom deformacije [1].

### **2.3.2. Utjecaj temperature na deformacijski otpor**

Temperatura deformacije, odnosno temperatura na kojoj se metal deformira, ima značajan utjecaj na deformacijski otpor metala. Temperatura može utjecati na mikrostrukturu metala. Povećanjem temperature smanjuje se otpor deformaciji jer toplinska energija povećava pokretljivost dislokacija, što u konačnici omogućuje lakše kretanje dislokacija tijekom deformacije [1].

### **2.3.3. Utjecaj brzine deformacije na deformacijski otpor**

Brzina deformacije, ima značajan utjecaj na deformacijski otpor metala. Povećanjem brzine deformacije povećava se otpor deformacije, a plastičnost opada. Postoji razlika između hladne i tople deformacije. Kod hladne plastične deformacije promjena brzine deformacije ne utječe značajno na deformacijski otpor, dok se kod tople plastične deformacije odvijaju procesi rekristalizacije i oporavka koji različito utječu na deformacijski otpor te s obzirom na njihov odnos na određenoj temperaturi, mijenja se i deformacijski otpor. Pri visokim brzinama deformacije, brzina rekristalizacije ne može pratiti brzinu deformacije, tako da je omekšavanje kroz rekristalizaciju i oporavak nepotpuno. Kao rezultat toga, povećava se deformacijski otpor [1, 10].

### 3. METODE ISTRAŽIVANJA DEFORMACIJE KOD METALNIH MATERIJALA

Postoje različite vrste ispitivanja materijala, tablica 1.

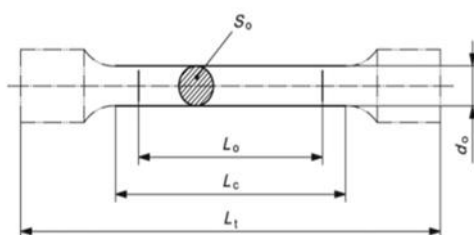
Tablica 1: Vrste ispitivanja materijala [4]

Mehanička ispitivanja			
Statička		Dinamička	
Kratkotrajna	Dugotrajna	Kratkotrajna	Dugotrajna
Vlačna	Puzanje	Udarni rad loma	Umor materijala
Tlačna	Relaksacija		
Savijanje			
Uvijanje			

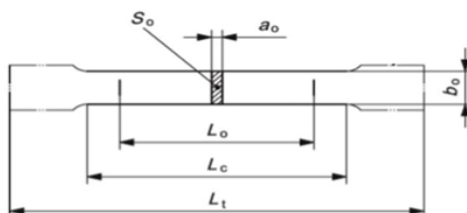
Najčešće korištene metode za ispitivanje materijala su mehaničke metode ispitivanja kojima se ujedno mogu odrediti i neka deformacijska svojstva. U mehanička ispitivanja spadaju statička i dinamička ispitivanja. Statičke metode ispitivanja mogu biti kratkotrajne (vlačna, tlačna, smična, savijanje, uvijanje) ili dugotrajne (puzanje, relaksacija), te dinamička kratkotrajna (udarna radnja loma) ili dugotrajna (dinamička izdržljivost). Sva ispitivanja mogu se provoditi na sobnoj, povišenoj ili sniženoj temperaturi [11]. U ovom radu provedena su ispitivanja statičkim vlačnim pokusom uz primjenu digitalne korelacije slike.

#### 3.1. Statički vlačni pokus

Statičke metode ispitivanja uglavnom pripadaju skupini razornih metoda ispitivanja materijala, kojima se mogu dobiti saznanja o mehaničkim svojstvima materijala. Najčešće korištena metoda je statički vlačni pokus kojim se ispituje elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog opterećenja. Provođi se na ispitnim uzorcima odnosno ispitnim epruvetama okruglog ili pravokutnog poprečnog presjeka, slike 4 i 5.



Slika 4. Okrugli poprečni presjek [11]



Slika 5. Pravokutni poprečni presjek [11]

gdje su:

$L_0$  – početna mjerna duljina, mm

$L_t$  – konačna mjerna duljina, mm

$S_0$  – početna površina presjeka, mm

$b_0$  – početna debljina, mm

$a_0$  – početna širina, mm

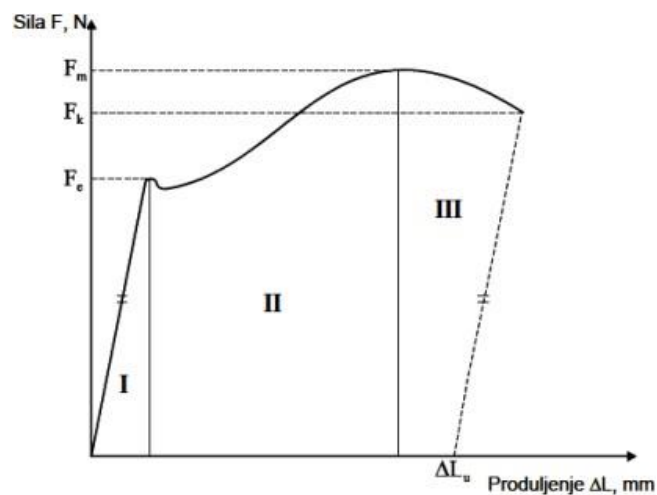
Za ispitivanje vlačne čvrstoće najčešće se koriste epruvete okruglog presjeka, no u slučaju kada se žele utvrditi mehanička svojstva nekog lima ili trake, koriste se uzorci pravokutnog poprečnog presjeka.

Statički vlačni pokus provodi se na mjernim uređajima – kidalicama, slika 6, koje mogu biti hidrauličke ili mehaničke. To su uređaji koji služe za vlačno ispitivanje materijala tijekom jednoosnog statičkog opterećenja. Prije samog ispitivanja, potrebno je izmjeriti početne dimenzije uzoraka, pri čemu se odabiru i parametri ispitivanja. Nakon postavljanja ispitnih uzoraka u čeljusti kidalice, uzorci se opterećuju vlačnom silom. S obzirom da u svakom tijelu opterećenje izaziva deformaciju, tako se i pri statičkom vlačnom pokusu epruveta produljuje. Zbog toga se u ispitivanju pored vrijednosti sile prati i produljenje epruvete. Dobivene podatke računalo obrađuje te ispisuje rezultate u obliku dijagrama sila/produljenje ( $F / \Delta L$ ) koji se još naziva i dijagramom kidanja, slika 7 [4,11].

Kidalice se sastoji od sljedećih dijelova – postolje (okvir), pokretnog dijela za opterećenje, uređaj koji mjeri sile te uređaj za očitavanje. Postolje se sastoji od vodilica i ostalih komponenti koji povezuju uređaj u cjelinu. Pogonski mehanizam se nalazi u postolju ili pokraj, ovisno o izvedbi uređaja. Postolje mora izdržati opterećenja usklađena s pogonskim sustavom te pruža stabilnost i podršku za cijeli vlačni sustav. To je temeljni dio kidalice na kojem se postavljaju ostali dijelovi. Pokretni dio uređaja (traverza kidalice) se pomiče prema naprijed i natrag ovisno o upravljanju uređajem. Ova komponenta primjenjuje silu na uzorak materijala a koji je ostvaren iz pogonskog dijela putem hidrauličkog ili mehaničkog sustava. Hidraulički sustav koristi hidraulički cilindar i ulje pod pritiskom kako bi generirao silu. Mehanički sustav, s druge strane, koristi elektromotor, zupčanike i prijenosne vijke za primjenu sile. Kako se sila primjenjuje, uzorak se produljuje sve do definiranog izduženja ili loma. Čeljusti kidalice su komponente koje drže uzorak materijala tijekom vlačnog pokusa te su povezane s pomičnom traverzom i nepomičnim postoljem kidalice. Obično se koriste dvije čeljusti koje čvrsto pričvršćuju uzorak kako bi se osigurala stabilnost i prijenos sile na uzorak, a oblikovane su tako da se prilagođavaju obliku i veličini uzorka [4,12].



Slika 6. Kidalica za statička ispitivanja do 100 kN [13]



Slika 7. Dijagram sila-produljenje [4]

Iz slike 7 je vidljivo da je dijagram kidanja podijeljen na tri područja. Prvo područje je područje elastične deformacije, a u njemu je prikazana linearna ovisnost sile i produljenja. Ono vrijedi sve do vrijednosti sile  $F_e$  (sila na granici tečenja ili tzv. granica proporcionalnosti). U drugom području dijagrama nakon granice tečenja, više nema linearne ovisnosti između povećanja sile i produljenja. Ispitni uzorak se nastavlja produljivati uz mali pad sile. Za daljnje produljenje potreban je ponovni porast sile, a kada primijenjena sila prijeđe granicu tečenja materijala, počinje plastična deformacija. Opterećenje raste sve do dostizanja maksimalne sile  $F_m$ , odnosno vlačne čvrstoće materijala. U trećem području dijagrama, nakon dostizanja maksimalne sile  $F_m$  ispitni uzorak se nastavlja produljivati uz sve manju silu sve do dostizanja vrijednosti sile  $F_k$  pri kojoj dolazi do loma ispitnog uzorka [4,14].

## **4. DIC METODA MJERENJA POMAKA I ODREĐIVANJA DEFORMACIJA KOD METALNIH MATERIJALA**

DIC (eng. Digital Image Correlation), odnosno digitalna korelacija slike je beskontaktna optička metoda koja se koristi za mjerenje pomaka na površini uzorka koji se deformira. DIC metoda koristi algoritme za obradu slike za praćenje kretanja markera između uzastopnih slika. Koristi se za praćenje promjena u obliku, veličini i pomaku materijala tijekom mehaničkih opterećenja, što je ključno za razumijevanje njegovih deformacijskih svojstava.

Osnovna ideja ove metode je usporediti sliku prije opterećenja (referentnu sliku) sa slikama nakon opterećenja te odrediti iznose pomaka i deformacije. Slike površine uzorka visoke razlučivosti snimaju se digitalnom kamerom. Važno je osigurati dobre uvjete osvjetljenja i dovoljan kontrast između uzorka i markera. Dobivene slike zahtijevaju korake predobrade, kao što su smanjenje šuma, poboljšanje slike i kalibracija. Kalibracija uključuje mjerenje poznate referentne duljine na slikama kako bi se uspostavio odnos između koordinata piksela i fizičkih dimenzija. Ovisno od izvedbe sustava, kalibracija može uključivati određivanje udaljenosti kamera od objekta, podešavanje fokusa i osvjetljenja kao i korištenje referentnih etalona za kalibraciju sustava.

Kod digitalne korelacije slike algoritmi uspoređuju intenzitet sivih tonova piksela u dvije uzastopne slike, kako bi identificirali odgovarajuće točke na površini uzorka. Algoritmi traže najbolje podudaranje između referentne slike i deformirane slike minimiziranjem razlike u vrijednostima intenziteta. Nakon što se identificiraju odgovarajuće točke algoritmi izračunavaju pomak svake točke, mjereći njihov pomak u koordinatnom sustavu. Taj se pomak obično izražava horizontalnom i vertikalnom komponentom.

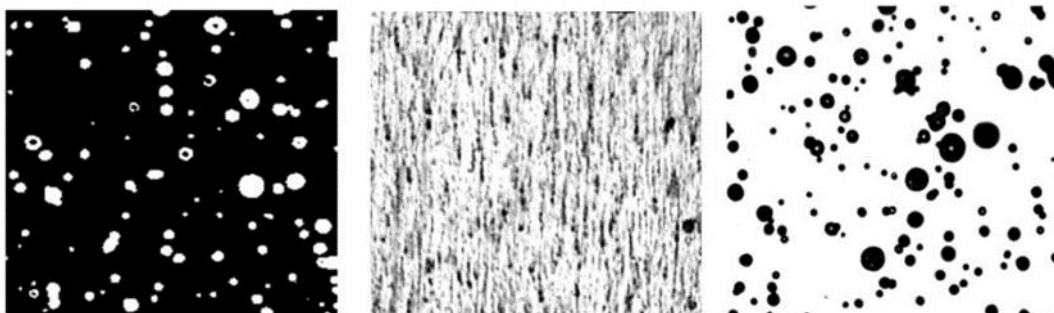
Analizom podataka o pomaku dobivenih metodom DIC mogu se izračunati iznosi deformacija. Deformacija predstavlja promjenu oblika materijala. Može se izvesti iz gradjenata pomaka u uzorku. Podaci o pomaku i deformaciji mogu se dalje analizirati, vizualizirati i koristiti u različite svrhe, kao što je karakterizacija materijala i validacija numeričkih modela. DIC metode nude nekoliko prednosti, uključujući beskontaktno mjerenje, visoku prostornu rezoluciju i mogućnost mjerenja velikih deformacija. Međutim, važno je uzeti u obzir faktore kao što su priprema površine, postavljanje kamere i točnost kalibracije, kako bi se osigurala pouzdana i točna mjerenja pomaka pomoću metode DIC [15, 16].

### **4.1. Važnost pripreme uzorka**

Priprema uzoraka za ispitivanje metodom DIC uključuje nekoliko koraka kako bi se osigurala točna i pouzdana mjerenja pomaka. Važno je osigurati postizanje odgovarajućeg kontrasta između podloge ispitivanog uzorka i nanesenih markera. Pravilna priprema uzoraka uključuje pripremu površine, nanošenje premaza, te stvaranje stohastičkog uzorka, što je ključno za točno praćenje pomaka i određivanje deformacija kod DIC metode. Potrebno je odrediti reprezentativni dio materijala koji se analizira te razmotriti čimbenike kao što su područje interesa, karakteristike površine i dostupnost za snimanje.

Površinska obrada uključuje nanošenje točkastih markera na površinu korištenjem spreja ili kista. U nekim slučajevima, koristi se toner kao alternativa boji ili spreju. Toner se može lako nanijeti na površinu uzorka pomoću tonerskog praha te obično ima visok kontrast i omogućuje jasno prepoznavanje karakterističnih markera. Stvaranje stohastičkog uzorka može se postići primjenom boje ili spreja s nasumičnim rasporedom na površinu uzorka. Važno je osigurati da su markeri međusobno različitih oblika, neravnomjerno raspoređeni i da

omogućuju jasan kontrast na slikama snimljenim DIC metodom, slika 8. Visoki kontrast olakšava programskom paketu da precizno korelira i uspoređi slike prije i poslije opterećenja. Uglavnom se koriste kombinacije bijela pozadina - crni markeri i crna pozadina-bijeli markeri, što poboljšava kontrast.



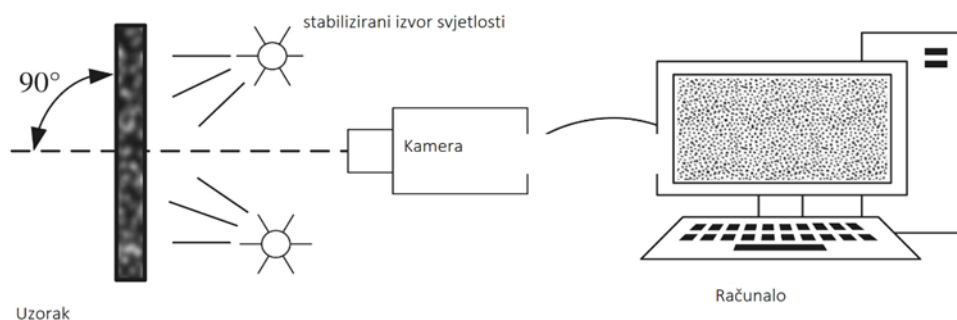
*Slika 8. Nasumični markeri na uzorku [17]*

Nakon nanošenja markera, bitno je utvrditi kvalitetu markera. Površinu je potrebno pregledati pri odgovarajućim uvjetima osvjetljenja ili snimiti probne slike kako bi se provjerila kvaliteta markera kroz sam DIC algoritam. Prije izvođenja stvarnog ispitivanja deformacije, potrebno je kalibrirati DIC sustav snimanjem slike kalibracijske ploče s poznatim dimenzijama i pomacima. Cilj kalibracije može biti mreža ili niz točaka s poznatim razmakom. Ovaj korak uspostavlja odnos između koordinata piksela slike i pomaka, omogućujući točna mjerenja. Pažljivim odabirom markera s odgovarajućim kontrastom i validacijom kontrasta pripremljene površine, može se osigurati točno mjerenje pomaka i deformacija pomoću DIC metode. Odabir markera i postignuti kontrast igraju ključnu ulogu u uspjehu i pouzdanosti DIC analize [17].

#### **4.2. 2D DIC metoda**

Metoda 2D DIC mjeri polja pomaka i deformacije na površini dvodimenzionalnog objekta. Ovaj proces obuhvaća pripremu uzorka, kao što su nanošenje boje, tonera i stvaranje stohastičkog uzorka, te digitalnu kameru, izvor svjetlosti i odgovarajući algoritam. Prije samog ispitivanja, DIC sustav je potrebno kalibrirati. Na slici se označavaju referentni markeri koji će se pratiti tijekom analize. Referentni markeri trebaju biti jasno vidljivi i dovoljno gusto raspoređeni kako bi se precizno pratili pomaci i deformacije, a digitalne kamere se ne bi smjele pomicati tako da ne dođe do grešaka prilikom snimanja.

Kako bi se pomak kamera sveo na minimum, za vrijeme ispitivanja kamerom se upravlja preko osobnog računala. Potrebno je osigurati da u krugu kamere nema kretnji, vibracija ili strujanja zraka što bi prouzročilo pomicanje kamere. DIC programski paket analizira seriju slika i uspoređuje položaje referentnih markera na svakoj slici s referentnom slikom markera. Na temelju promjena u položaju referentnih markera, programski paket izračunava pomake i deformacije površine materijala, te se rezultati mogu prikazati kao vektorsko polje koje prikazuje smjer i veličinu pomaka ili kao polje deformacija. Na slici 9 prikazan je shematski prikaz 2D DIC optičkog postava [18,19].



Slika 9. Shematski prikaz 2D DIC metode [20]

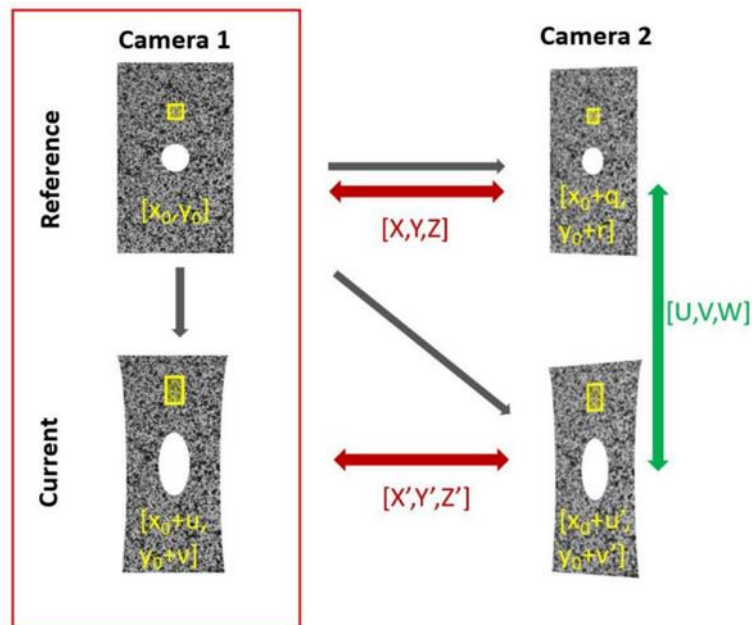
Važno je pravilno odabrati kameru koja odgovara specifičnim potrebama eksperimenta i ciljevima istraživanja. Potrebno je uzeti u obzir faktore kao što su rezolucija, brzina snimanja, dinamički raspon, osjetljivost i povezanost kamere s DIC programskim paketom koji se koristi za analizu slika. Neki od uobičajenih tipova kamere koje se koriste u 2D DIC mjerenjima su CCD kamere (eng. Charge-Coupled Device), CMOS kamere (eng. Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) te kamere velike brzine. CCD i CMOS kamere naširoko se koriste u 2D DIC-u. CCD kamere nude bolju kvalitetu slike i osjetljivost, dok CMOS kamere obično imaju veći broj slika u sekundi i manju potrošnju energije. Međutim, napredak u CMOS tehnologiji značajno je poboljšao njihovu kvalitetu slike. CCD kamere pružaju visoku kvalitetu slike, imaju nisku razinu šuma, što rezultira čistim slikama, imaju veliki dinamički raspon, što omogućuje snimanje svijetlih i tamnih područja na površini uzorka. Također mogu snimati kvalitetne slike prilikom slabijeg osvjjetljenja. CCD kamere dolaze u različitim veličinama, što omogućuje prilagodbu potrebama eksperimenta.

Moguće je odabrati kamere s različitim brojem piksela, brzinom snimanja i drugim značajkama koje odgovaraju specifičnim zahtjevima DIC mjerenja. Snimanjem slika se uglavnom dobiju pouzdani rezultati na makro razini, dok se kod dobivanja rezultata na mikro ili nano razini koriste različiti mikroskopi. Kamere velike brzine prikladne su za snimanje brzih događaja ili dinamičkih procesa u kojima se kretanje odvija brzo. Ove kamere mogu snimiti veći broj slika u sekundi, što omogućuje snimanje brzih deformacija [17, 21, 22].

### 4.3. 3D DIC metode

3D DIC metoda je naprednija verzija 2D DIC metode i koriste se za mjerenje pomaka i deformacija u trodimenzionalnom prostoru. Dok se 2D DIC metoda fokusira samo na površinu materijala, 3D DIC metoda omogućuje mjerenje deformacija u svim prostornim smjerovima. Kod 3D DIC metoda, koriste se dvije ili više kamere postavljene pod različitim kutovima, kako bi se snimile slike ispitivanih materijala iz različitih perspektiva. Ovaj proces uključuje pravilnu pripremu uzoraka, bilo primjenom boje, tonera ili raspršivanjem posebnih markera kako bi se stvorili referentni uzorci. Nakon toga slijedi kalibriranje kamere kako bi se odredili njihovi unutarnji parametri poput žarišne duljine, koeficijenta izobličenja i položaja, te se moraju podesiti senzori za odgovarajući mjerni volumen, leće i kut kamere, otvor blende kamere te polarizacijska stakla. Kalibracija se provodi pomoću kalibracijskih objekata (ploča ili štapova) koji na sebi imaju referentne točke s konstantnim i unaprijed poznatim udaljenostima. Zatim kamere snimaju slike materijala tijekom opterećenja. Slike se snimaju pod različitim kutovima i moraju pokrivati cijelu površinu uzorka.

Na snimljenim slikama odabiru se područja koja će se pratiti tijekom analize. Na temelju praćenja markera ili područja na svim slikama, programski paket računa trodimenzionalne pomake i deformacije materijala. Ovi podaci se prikazuju kao vektorska polja koja prikazuju smjer i veličinu pomaka u svakoj točki. Slika 10 prikazuje princip rada metode DIC: prva slika kamere 1 koristi se kao referentna slika s kojom se uspoređuje slika kamere 2 (snimljene istovremeno). Odgovarajuće točke mogu se triangulirati u trodimenzionalnu točku u prostoru (označenu kao  $[X,Y,Z]$ ) ako je orijentacija kamera poznata (izvođenjem kalibracije prije testiranja). Isto podudaranje točaka može se provesti tijekom vremena tako da se svaka mjerna točka može pratiti, što dovodi do praćenja ukupne deformacije površine uzorka (deformacija označena kao  $[U,V,W]$ ) [18, 23].



Slika 10. Princip rada 3D DIC metode [24]

U 3D DIC metodi izbor kamere ovisi o nekoliko čimbenika, uključujući željenu rezoluciju, broj slika u sekundi, vidno polje, uvjete osvjetljenja i specifične zahtjeve eksperimenta. Kamere CCD i CMOS, stereo kamere te kamere velikih brzina mogu se koristiti kod 3D DIC metode. 3D DIC programski paket može rekonstruirati trodimenzionalne podatke o pomacima i deformacijama materijala. Stereo kamere mogu se koristiti za snimanje područja različitih veličina, ovisno o njihovom optičkom rasponu. Važno je odabrati kamere koje imaju visoku rezoluciju, dobru osjetljivost na svjetlost i nisku razinu šuma kako bi se osigurala kvalitetna i precizna snimka površine materijala. Također, kamere trebaju biti sinkronizirane kako bi se osiguralo da snimljene slike iz različitih kutova budu usklađene za daljnju obradu podataka [22, 25-27].

#### 4.4. Nehomogene deformacije

U području analize materijala proučavanje lokaliziranih deformacija predstavlja složen i važan put istraživanja. Ipak, dva fascinantna fenomena, Lüdersove linije i Portevin-Le Chatelierov (PLC) efekt, služe kao glavni primjeri takvih lokaliziranih deformacija.

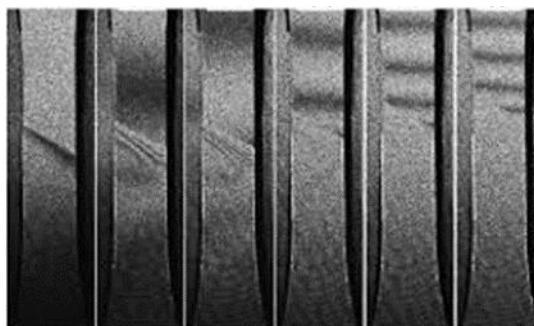


#### 4.4.1. Lüdersove linije

Lüdersove linije na površinama određenih materijala tijekom plastične deformacije, osobito čelika, ostavljaju vidljive tragove, (slika 11). Ove linije se obično uočavaju u materijalima određenog kemijskog sastava i specifične strukture uz prisustvo vrlo tvrdih čestica koje zaustavljaju kretanje dislokacija. Uz to što utječu na mehanizme deformacije prilikom preoblikovanja, mogu ostaviti tragove na površini oblikovanog komada.

Lüdersove linije uzrokovane su lokalizacijom deformacije, gdje plastična deformacija postaje lokalizirana u određenim područjima materijala. Kako se primjenjuje naprezanje, materijal se u početku podvrgava elastičnoj deformaciji dok ne dosegne granicu tečenja. Iznad granice tečenja dolazi do plastične deformacije, a dislokacije se kreću kroz strukturu materijala. U materijalima sklonim stvaranju Lüdersovih linija, plastična deformacija se inicijalno lokalizira u određenim dijelovima zone deformacije. Pri tome se deformacija odvija u uskim područjima, Lüdersovim linijama, što rezultira stvaranjem vidljivih traka na površini deformiranog komada.

Mehanizmi koji uzrokuju stvaranje Lüdersove linije su složeni i mogu varirati ovisno o specifičnom materijalu i njegovoj mikrostrukturi. Općenito prihvaćeno objašnjenje uključuje interakciju između dislokacija i prepreka unutar materijala. Prepreke koje su najčešće uzrok ovoj pojavi su precipitati ili tzv. atmosfere otopljenih metala u osnovnom materijalu, koje koče kretanje dislokacija. Kako se materijal deformira, dislokacije se mogu akumulirati i utjecati na te prepreke, uzrokujući lokalizaciju plastične deformacije i formiranje Lüdersovih linija. U primjenama gdje se želi postići homogena deformacija, pojava Lüdersovih linija je nepoželjna pojava. Stoga je razumijevanje i kontroliranje pojave Lüdersovih linija važno u obradi materijala i inženjerstvu [28].



Slika 11. Lüdersove linije [29]

#### 4.4.2. Portevin-Le Chatelier efekt

Portevin-Le Chatelier (PLC) efekt je pojava koja se opaža tijekom deformacije nekih materijala, posebno je česta kod određenih Al legura. Karakterizira ga nazubljena deformacijska krivulja na dijagramu naprezanje-deformacija, gdje naprezanje oscilira tijekom plastične deformacije. Do pojave efekta dolazi zbog interakcije između dislokacija i atoma otopljenih elemenata ili nečistoća prisutnih u leguri. Kada je materijal podvrgnut plastičnoj deformaciji, dislokacije se kreću kroz rešetku, a na njihovo gibanje može utjecati prisutnost atoma otopljenih elemenata. Jedan od općeprihvaćenih mehanizama kojim se opisuje PLC efekt je dinamičko deformacijsko starenje, gdje su atomi otopljenih elemenata u interakciji s pokretnim dislokacijama, uzrokujući povećanje naprezanja. Kada koncentracija otopljenih atoma oko dislokacija postane dostatna, kretanje dislokacija se blokira, što dovodi do

smanjenja broja pokretnih dislokacija i povećanja naprezanja. Zatim kada naprezanje dosegne vrijednost pri kojoj se blokirane dislokacije oslobađaju ili umnožavaju, broj pokretnih dislokacija raste, što dovodi do smanjenja naprezanja. Ponavljajuće povećanje i smanjenje naprezanja dovodi do diskontinuiteta na krivulji deformacijskog očvršćivanja, odnosno nazubljene krivulje na dijagramu naprezanje-deformacija [19,30].

## 5. USPOREDBE 2D I 3D MJERENJA METODOM DIC

Istraživanja u literaturi [22, 31] uspoređuju točnost i učinkovitost 2D i 3D DIC metoda u mjerenju deformacija. Ustanovili su da 2D DIC daje dobre rezultate za jednostavne strukturne geometrije, dok je 3D DIC potreban za precizno mjerenje složenih geometrija i deformacijskih polja u trodimenzijskom sustavu. S druge strane, u istraživanjima [31] uspoređivale su se 2D i 3D DIC metode za mjerenje deformacije membrane gdje se ustanovilo da obje metode daju točne rezultate, ali 3D DIC učinkovitiji je u hvatanju potpunog trodimenzionalnog ponašanja membrane, što bi moglo biti ključno za određene primjene. Koja je metoda bolja i učinkovitija, ovisi o različitim utjecajnim faktorima, specifičnoj primjeni i prirodi deformacije koja se mjeri. Općenito se smatra da 3D DIC daje detaljnije rezultate za složene geometrije i deformacije izvan ravnine. Međutim, dolazi s povećanom složenošću, cijenom i zahtjevima za obradu podataka u usporedbi s 2D DIC-om. U istraživanjima se sugerira da 3D DIC ima prednost u odnosu na 2D DIC kada se radi o mjerenju složenih geometrija i hvatanju trodimenzionalnih deformacija. Međutim, učinkovitost svake metode ovisi o specifičnoj primjeni i potrebnoj razini točnosti. Važno je uzeti u obzir faktore kao što su cijena, dostupnost opreme i mogućnosti obrade podataka kada se bira između 2D i 3D DIC metode [22, 31].

Bitna razlika kod ispitivanja 2D i 3D DIC metodom je broj korištenih kamera u mjerenju. Razlika dimenzionalnosti između 2D DIC i 3D DIC metode leži u tome kako se mjere pomaci i deformacije materijala. Kod 2D DIC metode, mjerenja su ograničena na dvodimenzionalnu površinu materijala. To znači da se pomaci i deformacije mogu pratiti samo u ravnini snimljenih slika (obično u X-Y ravnini). Metoda koristi snimljene slike s jedne kamere koja bilježi promjene uzorka na površini materijala. Iako se mogu dobiti korisni podaci o pomacima i deformacijama u ispitnoj ravnini snimki, 2D DIC metoda ne pruža informacije o promjenama u dubini ili izvan ravnine snimanja. S druge strane, 3D DIC metoda omogućuje mjerenje pomaka i deformacija u trodimenzionalnom prostoru. Ova metoda koristi snimljene slike s dvije ili više kamere postavljene pod različitim kutovima kako bi se rekonstruirao trodimenzionalni oblik površine materijala i pratio pomak i deformacije u svim prostornim smjerovima (X, Y i Z).

Razlika u preciznosti između 2D DIC i 3D DIC metode ovisi o više faktora, uključujući složenost deformacije, površinsku teksturu materijala, razlučivost kamere i postavke eksperimenta. Općenito, 3D DIC metoda pruža veću preciznost u mjerenju pomaka i deformacija u trodimenzionalnom sustavu u odnosu na 2D DIC metodu jer omogućuju mjerenje u svim prostornim smjerovima, dok je 2D DIC metoda ograničena na dvodimenzionalnu ravninu.

Razlika u primjeni između 2D DIC i 3D DIC metoda leži u njihovim sposobnostima. 2D DIC metoda može se koristiti za ispitivanje materijala tijekom mehaničkih ispitivanja. Omogućuje praćenje ponašanja materijala tijekom opterećenja, uključujući deformacije te se često koristi u inženjerskim analizama i istraživanjima materijala. Također, može se primijeniti za mjerenje materijala, kako u statičkim tako i u dinamičkim uvjetima. Omogućuje praćenje promjena u realnom vremenu, što je korisno za analizu dinamičkih procesa i odgovora materijala na brzinu opterećenja. 3D DIC metoda pruža trodimenzionalne informacije, što je posebno korisno kada su prisutne deformacije u dubini ili izvan ravnine snimanja. Uglavnom se primjenjuje za mjerenje deformacija na složenim geometrijama materijala. Idealna je za mjerenje deformacija kod materijala s kompleksnim oblicima, asimetrijama i strukturama s više slojeva. Može se koristiti za istraživanje deformacija kod složenih kompozitnih materijala, konstrukcija s tankim zidovima, slojevitih materijala i sl. 3D DIC metoda se često koristi za praćenje deformacija materijala pod termičkim opterećenjima, poput širenja, skupljanja ili

savijanja uzoraka uzrokovanih promjenama temperature. To je važno u područjima poput termalnog inženjerstva, zrakoplovne industrije i energetike [30-33].

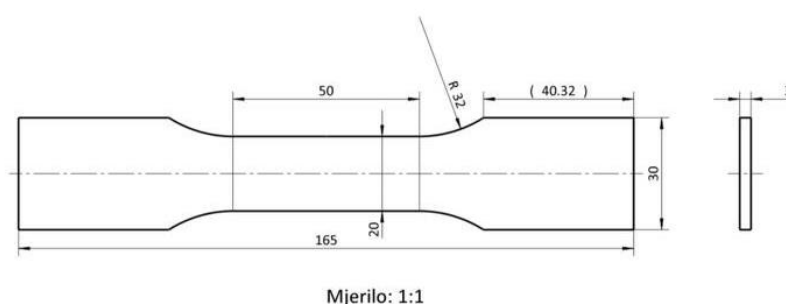
## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

Za ispitivanja usporedbe 2D i 3D DIC metode te izmjerenih vrijednosti deformacija i brzina deformacije uzorci su uzimani iz hladno valjanog lima debljine 3 mm iz Al-Mg legure 5754. Propisani kemijski sastav dan je u tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav ispitivane legure

<i>Kemijski element</i>	<i>mas %</i>
<i>Magnezij (Mg)</i>	2.60 - 3.60
<i>Silicij (Si)</i>	0.0 - 0.40
<i>Krom (Cr)</i>	0.0 - 0.30
<i>Bakar (Cu)</i>	0.0 - 0.10
<i>Ostali</i>	0.0 – 2,0
<i>Al</i>	ostatak

Ispitni uzorci uzimani su u smjeru valjanja i pripremljeni na CNC uređaju. Dimenzije uzoraka dane su slikom 12.



Slika 12. Nacrt uzorka za ispitivanje

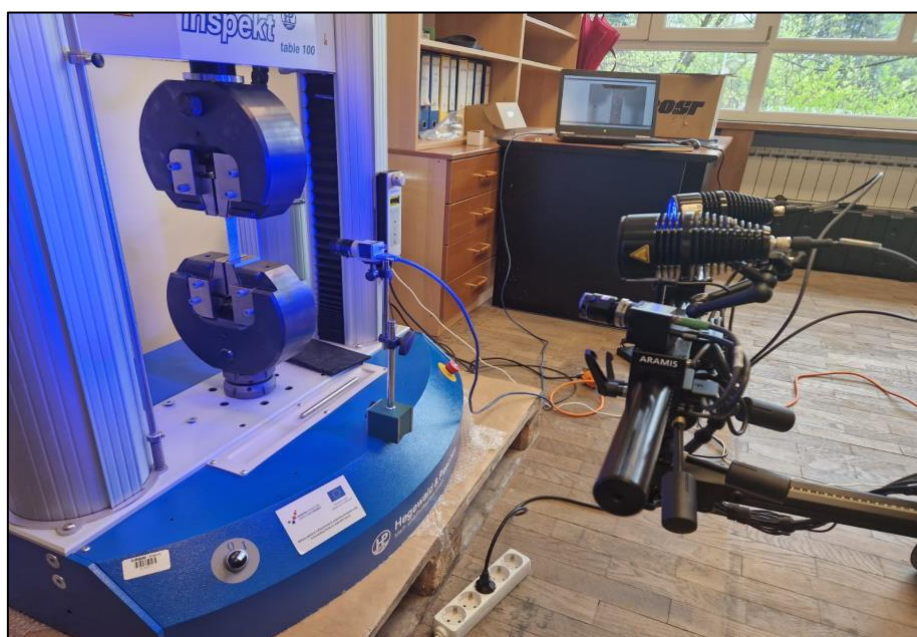
Za ispitivanje 2D i 3D DIC metodama uzorci su se morali adekvatno pripremiti. U tu svrhu korišteni su premazi mat bijeli ral 9000 i crni GRAPHIT 33 za crne markere u spreju. Na površini ispitnih uzoraka prvo je nanesen bijeli mat premaz. Nakon sušenja primarnog sloja, na uzorak su naneseni nasumični crni markeri pomoću crnog mat premaza u obliku markera, slika 13. Prije ispitivanja provjerena je mogućnost uspostave korelacije na pripremljenim uzorcima kroz korištene programske pakete.



Slika 13. Pripremljeni uzorak za DIC ispitivanja

Uzorci su podvrgnuti statičkom vlačnom pokusu s konstantnim pomakom traverze. Vlačno opterećenje ispitnih uzoraka provedeno je kralicom Hegewald&Peschke 100kN, slika 14. Tijekom ispitivanja odabrana je brzina pomaka traverze od 30 mm/min. Deformacija uzoraka tijekom statičkog vlačnog ispitivanja snimana je paralelno koristeći kamere za 2D DIC i 3D DIC metodu. Za ispitivanje 2D DIC metodom korištena je kamera Basler ace acA2500-14μm, rezolucije 5 MPix, postavljane okomito u odnosu na ispitni uzorak, slika 14.

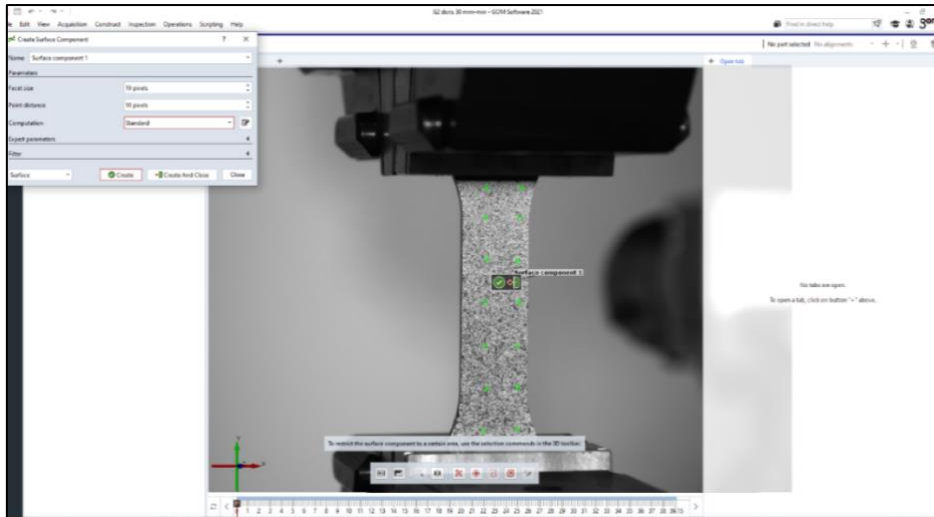
Uz kameru za 2D DIC metodu (prednja kamera), na slici 14, prikazan je korišteni sustav za 3D DIC metodu, ARAMIS Adjustable 2D/3D 12M sistem (stražnja strana). Prema tehničkim specifikacijama, sustav ima dvije kamere rezolucije 12 MPix.



*Slika 14. Postavljena oprema za ispitivanje 2D i 3D DIC metodama*

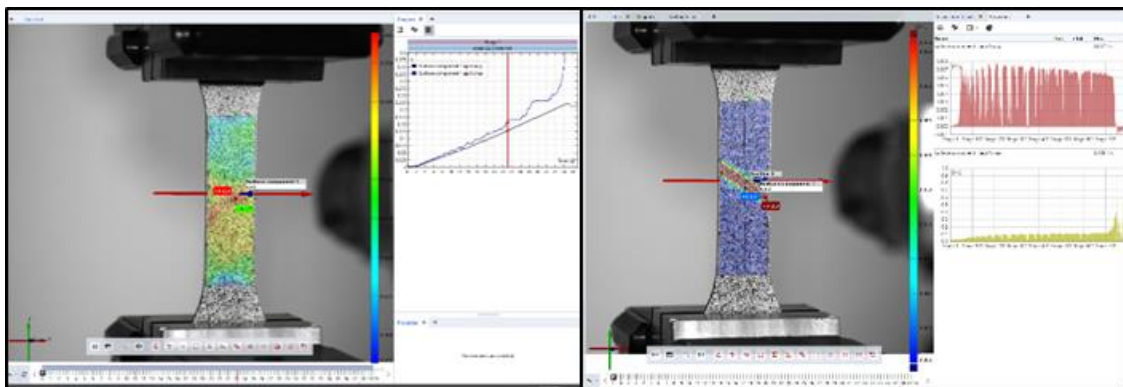
Prije samog ispitivanja, oba sustava za 2D i 3D DIC metodu su kalibrirana, a nakon toga je provjerena kvaliteta pripreme uzoraka za svaku metodu posebno. Provjera kvalitete pripreme uzoraka provodi se kroz programski paket GOM Correlate za analizu pomaka kod obje metode. Odabirom funkcije „pattern quality“ provjerena je kvaliteta nanesenih markera. Prilikom ispitivanja i snimanja pomaka, 2D metoda je podešena na frekvenciju zapisa od 10 Hz, što je odgovaralo snimanju 10 slika u sekundi. U sustavu ARAMIS za 3D metodu podešena je frekvencija zapisa na kamerama od 20 Hz, odnosno snimanje 20 slika u sekundi.

Ispitivanja kod obje metode (2D i 3D) su istovremeno pokrenuta s početkom statičkog vlačnog pokusa (razvlačenjem uzoraka) te su uzorci snimani kontinuirano sve do loma. Nakon ispitivanja uslijedila je analiza snimljenih rezultata pomoću programskog paketa GOM Correlate. Kod obje metode korišteni su isti parametri za korelaciju snimljenih digitalnih slika, slika 15.



Slika 15. Parametri korelacije za 2D i 3D DIC ispitivanja

Za analizu je odabrano cijelo mjerno područje ispitnih uzoraka, standardna korelacija, pri čemu su odabrani odgovarajući parametri prikazani na slici 15. Nakon ispitivanja analizirani su rezultati dobivenih iznosa deformacija i brzina deformacije tijekom statičkog vlačnog pokusa, slika 16.



a)

b)

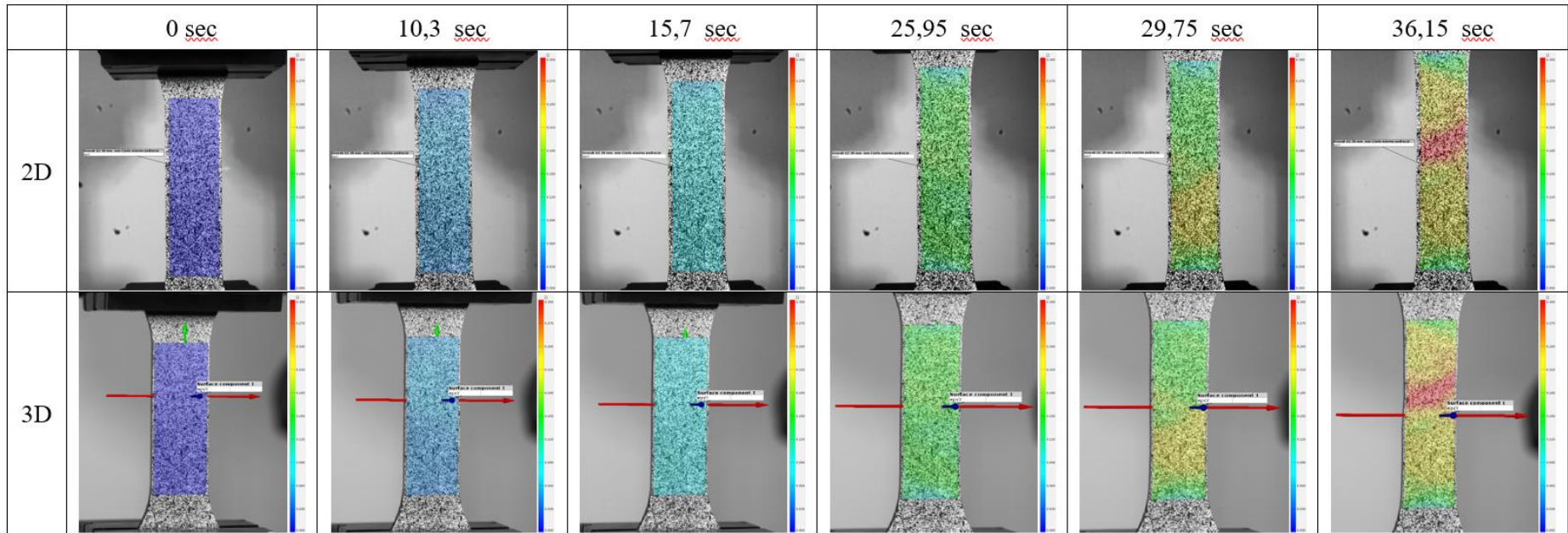
Slika 16. DIC analiza tijekom statičkog vlačnog pokusa: a) analiza deformacije, b) analiza brzine deformacije

Analiza ispitivanja 2D i 3D DIC metodom provedena je na način da su se mjerile maksimalne i srednje vrijednosti izmjerenih deformacija tijekom statičkog vlačnog pokusa. Nakon toga, na isti način provedena je analiza promjene brzine deformacije na uzorcima tijekom trajanja cijelog eksperimenta.

Nakon analize ukupnih iznosa deformacije i brzine deformacije, izvršena je linijska analiza deformacije i brzina deformacije duž ispitnog dijela uzorka. Kod obje korištene metode podešeni su isti parametri i pozicija ispitivanja uzoraka. Na dijagramima sila-produljenje ostvarenim statičkim vlačnim pokusom, odabrane su točke interesa za daljnju analizu. Na istim uzorcima istovremeno su provedena DIC ispitivanja 2D i 3D metodom. U tim točkama, točnije u tim vremenima, vršena je linijska analiza deformacije i promjene brzine deformacije s obje metode (2D i 3D). Analiza razlike u rezultatima između korištenih metoda dana je na osnovu deformacijskih mapa i mapa raspodjele brzine deformacije kod obje metode.

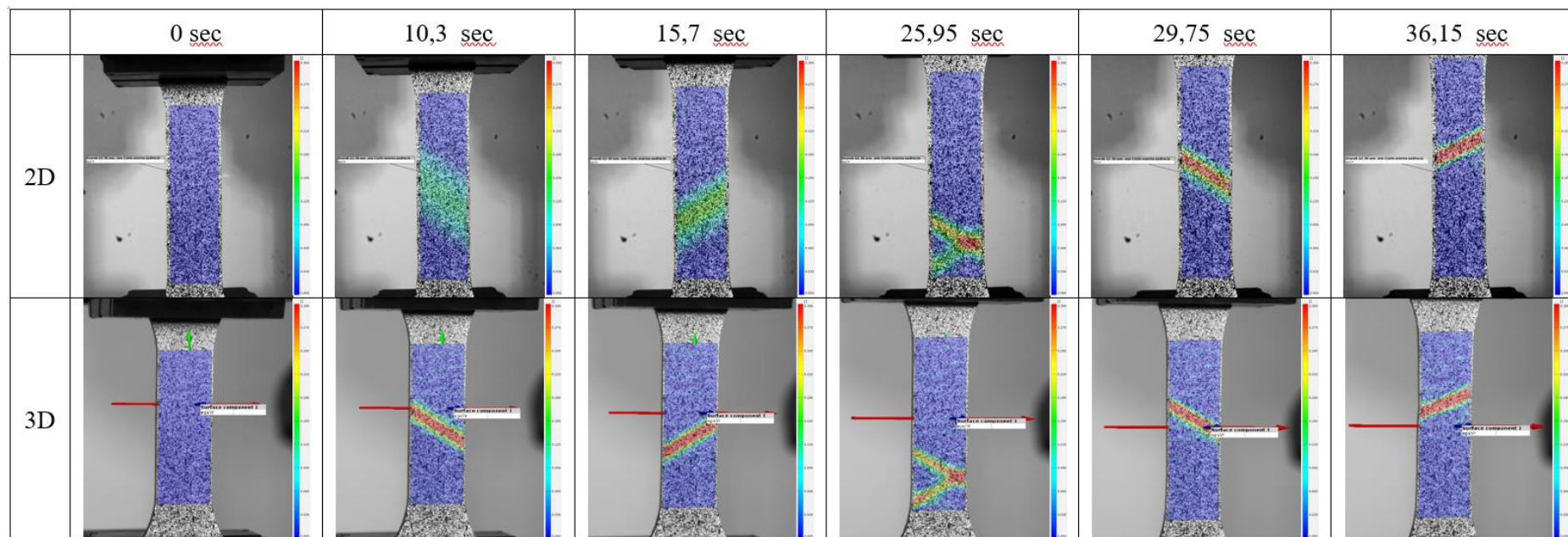
## 7. REZULTATI I RASPRAVA

Usporedba kvalitativnih rezultata u obliku deformacijskih mapa, dobivenih DIC metodama 2D i 3D, prikazani su na slikama 17 i 18.



Slika 17. Usporedba DIC prikaza raspodjele deformacije tijekom eksperimenta određenih 2D i 3D DIC metodom



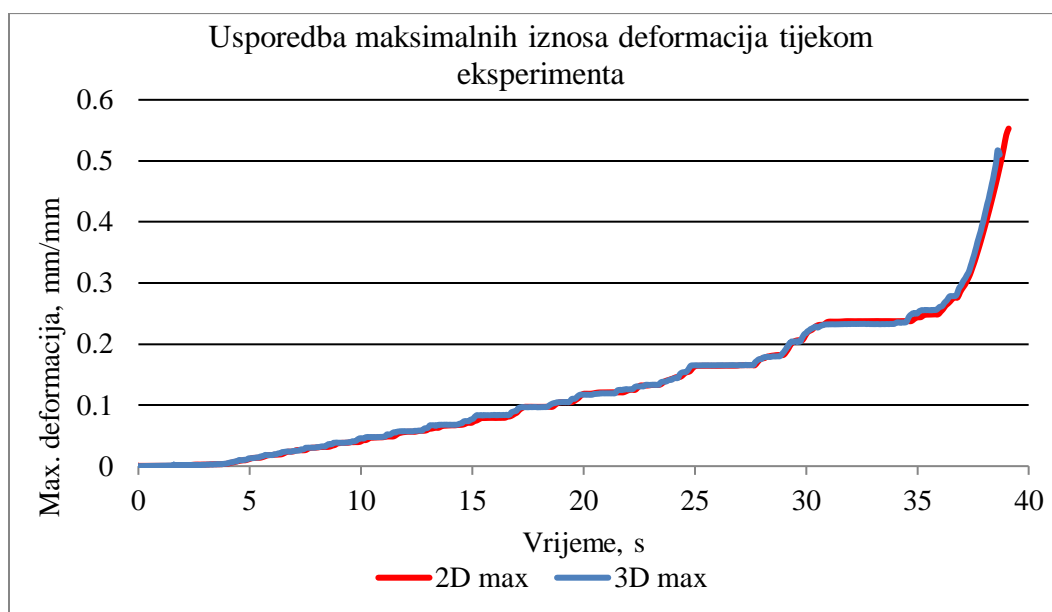


Slika 18. Usporedba DIC prikaza raspodjele brzine deformacije tijekom eksperimenta određenih 2D i 3D DIC metodom

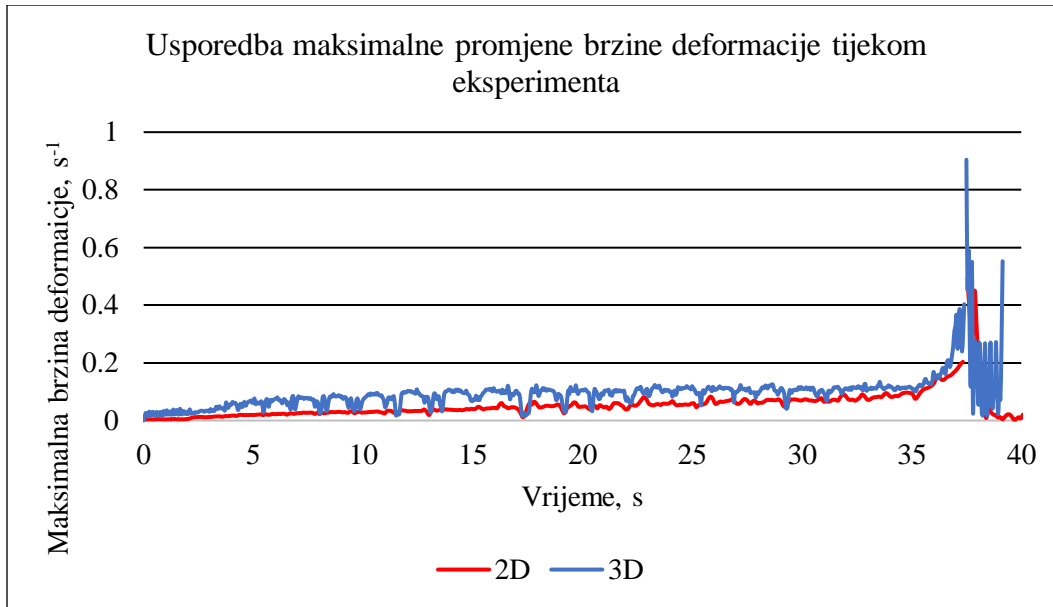
Kvalitativnim rezultatima u obliku deformacijskih mapa, koje prikazuju usporedbu različitog obojenja deformacijskih mapa dobivenih 2D i 3D DIC metodom tijekom statičkog vlačnog pokusa, utvrđeno je da ne postoje razlike u izmjerenim deformacijama. Deformacijske mape, 2D i 3D DIC, u odabranim točkama pokazale su gotovo identična obojenja odnosno iznose i raspodjelu deformacija za mjerno područje ispitivanih uzoraka, slika 17. Stoga se dolazi do zaključka da nisu utvrđene razlike kod kvalitativnih rezultata izmjerenih 2D i 3D DIC metodom. Na slici 18 prikazane su mape promjene brzine deformacije korištenjem oba sustava za DIC analizu. Jasno je uočljiva razlika u raspodjeli brzine deformacije u početku testa. 3D DIC metoda pokazuje znatno užu zonu promjene brzine deformacije, a nakon što se ostvari određeni stupanj deformacije, razlike postupno nestaju i raspodjela promjene brzine deformacije je gotovo identična kod oba korištena sustava.

Rezultati provedene analize iznosa i raspodjele deformacija i brzina deformacije prikazani su u nastavku rada. Usporedba kvantitativnih rezultata izmjerenih 2D i 3D DIC metodom, za maksimalne i srednje vrijednosti iznosa deformacija i brzina deformacija, prikazana je na slikama 19-22.

Dijagramima na slikama 19 i 20 prikazane su usporedbe rezultata analize maksimalnih iznosa deformacija i brzina deformacije tijekom statičkog vlačnog ispitivanja Al-Mg legure, korištenjem 2D i 3D metoda tijekom DIC ispitivanja.



Slika 19. Usporedba maksimalnih iznosa ukupne deformacije dobivenih DIC metodama 2D i 3D

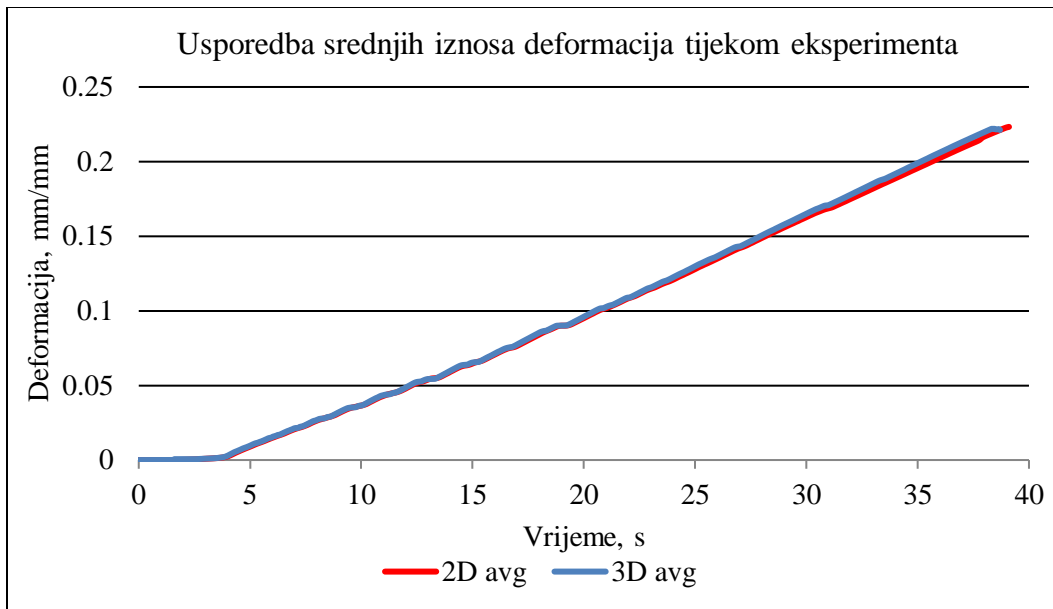


*Slika 20. Usporedba maksimalnih iznosa brzina deformacija tijekom eksperimenta dobivenih DIC metodama 2D i 3D*

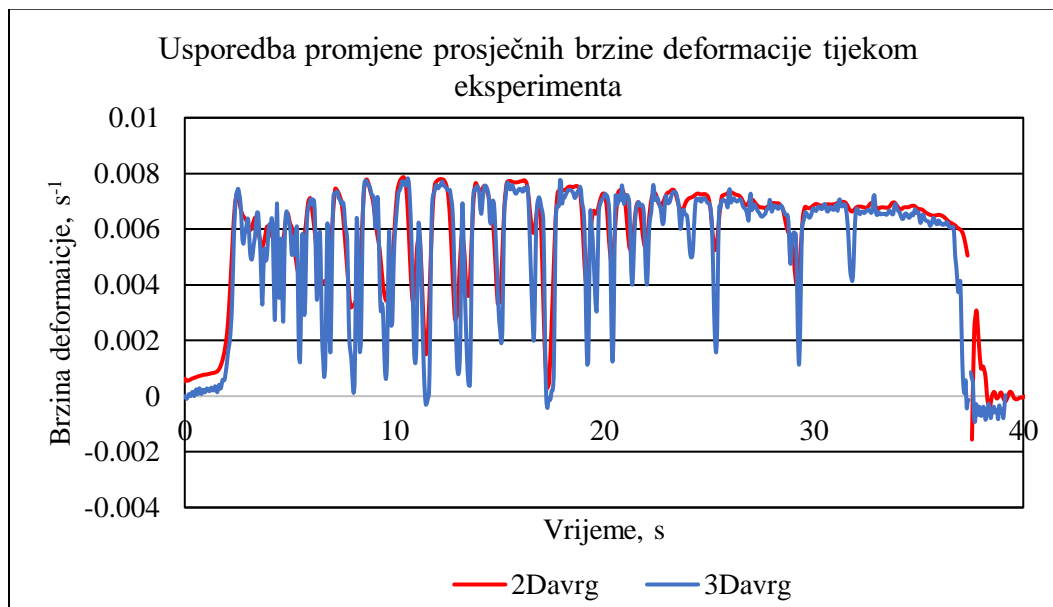
Iz dobivenih kvantitativnih rezultata, prikazanih na slici 19, utvrđeno je da ne postoji razlika između izmjerenih iznosa maksimalnih deformacija kod DIC ispitivanja metodama 2D i 3D. Jasno je vidljivo da se izmjerene maksimalne vrijednosti deformacija, 2D i 3D metodama, vrlo dobro preklapaju od početka razvlačenja pa sve do loma ispitnih uzoraka.

Pri određivanju maksimalnih iznosa brzine deformacije rezultati ukazuju kako se korištenjem 3D metode uočavaju više izmjerene vrijednosti brzine deformacije u usporedbi s 2D metodom.

Nadalje je provedena analiza srednjih izmjerenih vrijednosti iznosa deformacije i brzina deformacije tijekom DIC ispitivanja metodama 2D i 3D, slike 21 i 22.



Slika 21. Usporedba srednjih iznosa deformacija dobivenih DIC metodama 2D i 3D



Slika 22. Usporedba srednjih iznosa brzina deformacije tijekom eksperimenta određenih 2D i 3D metodom

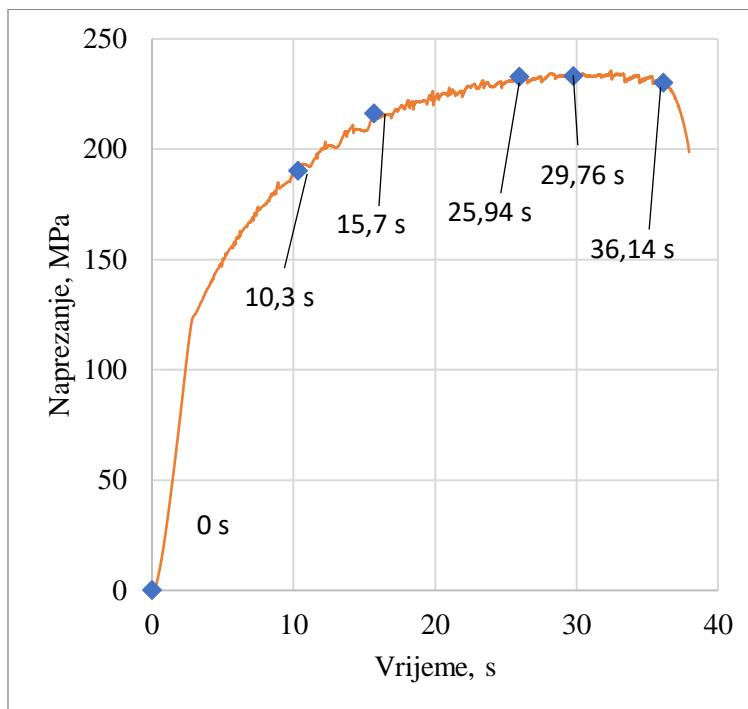
Na dijagramu usporedbe srednjih izmjerenih iznosa deformacije, slika 21, tijekom razvlačenja ispitnih uzoraka utvrđeno je da ne postoji razlika u dobivenim rezultatima metodama 2D i 3D tijekom DIC ispitivanja. Stoga se može zaključiti da su izmjerene maksimalne i srednje

vrijednosti deformacija kod 2D i 3D DIC metode gotovo identične, odnosno ne postoji razlika u izmjerenim iznosima i raspodjeli deformacija.

Nasuprot tome kod analize rezultata promjene brzine deformacije uočavaju se određene razlike. Rezultati mjerenja 3D DIC metodom ukazuju na veće padove u iznosima brzine deformacije, nego što je to u slučaju ispitivanja metodom 2D.

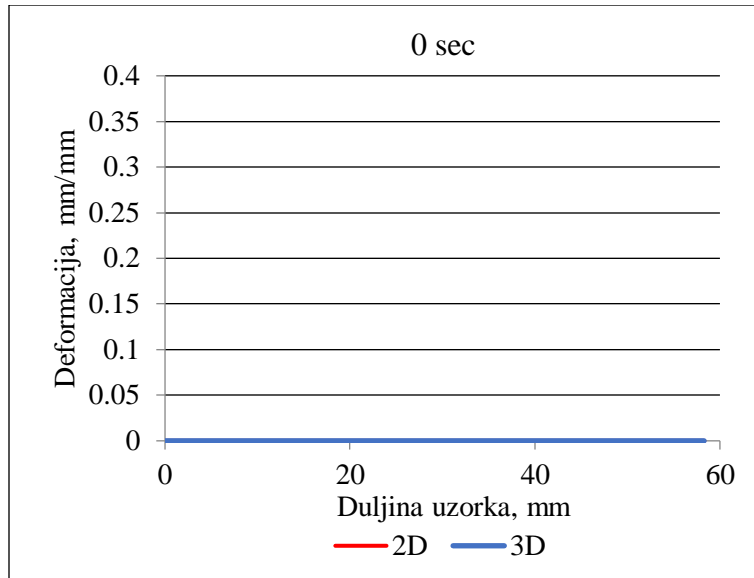
Kako bi se detaljnije utvrdile eventualne razlike u rezultatima dobivenim 2D i 3D DIC metodom za iznose deformacija i brzine deformacija tijekom statičkog vlačnog pokusa, odabrane su točke interesa te su vremena u kojima je provedena linijska analiza prikazane slikom 23.

Na slici 23 prikazane su točke vremena u kojima su provedene kvalitativna analiza (deformacijske mape) i kvantitativna (linijska) analiza kako bi se napravila detaljnija analiza usporedbe izmjerenih vrijednosti, deformacija i brzina deformacije, metodama 2D i 3D tijekom DIC ispitivanja.

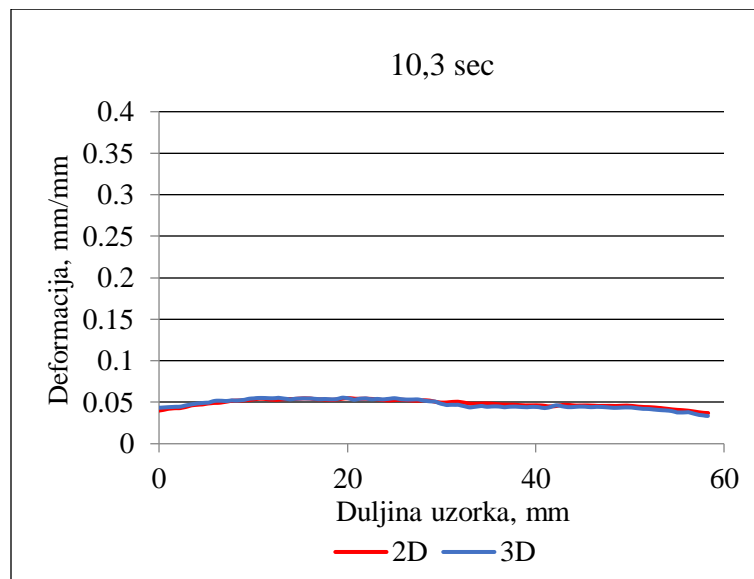


Slika 23. Dijagram naprežanje – vrijeme

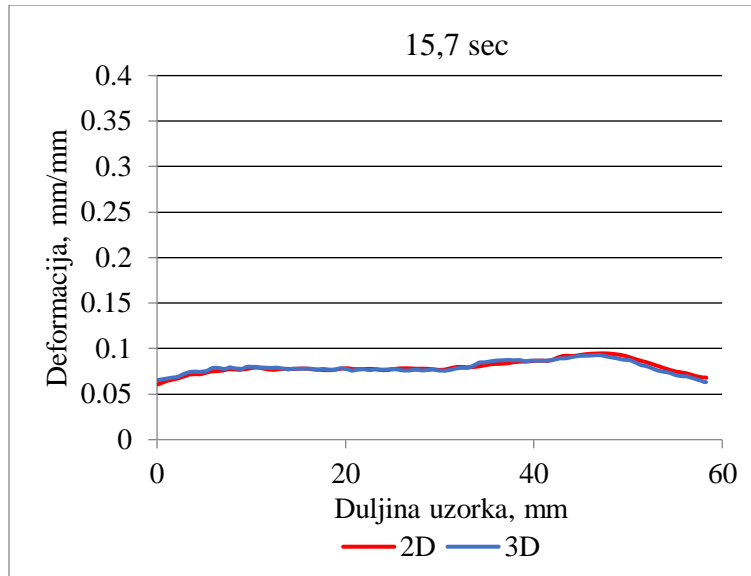
U odabranim vremenskim točkama provedena je linijska analiza promjene deformacija i brzine deformacije, slike 24 – 35. Navedeni dijagrami prikazuju usporedbu izmjerenih vrijednosti deformacija i promjene brzine deformacije dobivenih DIC analizama metodama 2D i 3D.



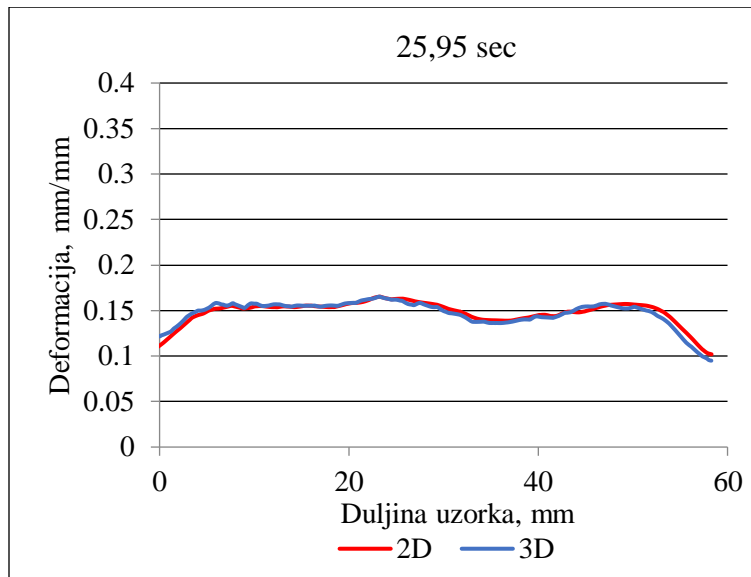
Slika 24. Linijska analiza iznosa deformacija po dužini ispitnog uzorka pri 0 sekundi



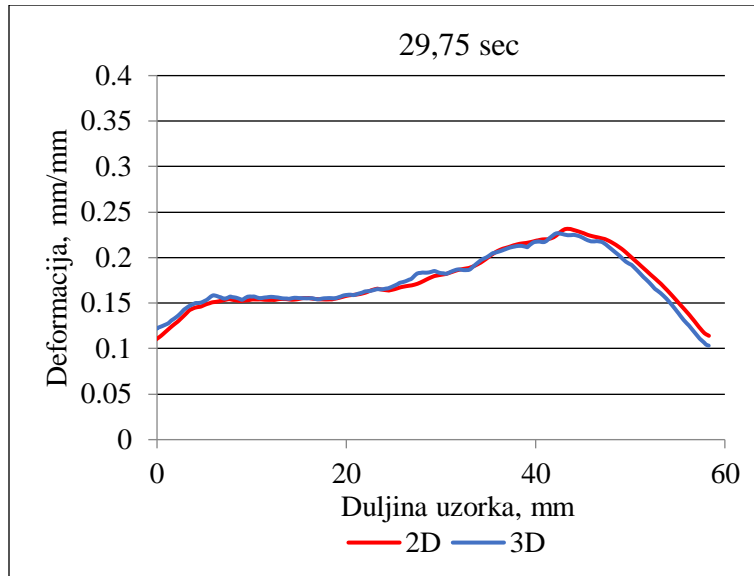
Slika 25. Linijska analiza iznosa deformacija po dužini ispitnog uzorka pri 10,3 sekundi



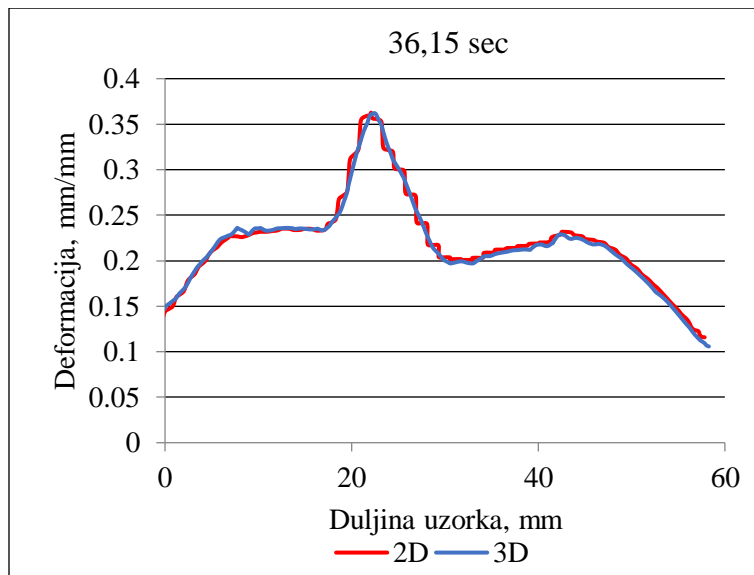
Slika 26. Linijska analiza iznosa deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 15,7 sekundi



Slika 27. Linijska analiza iznosa deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 25,95 sekundi

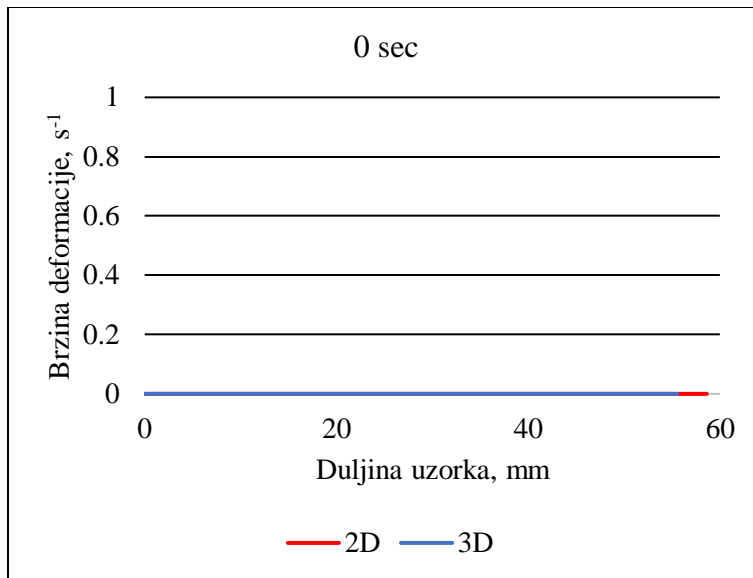


Slika 28. Linijska analiza iznosa deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 29,75 sekundi

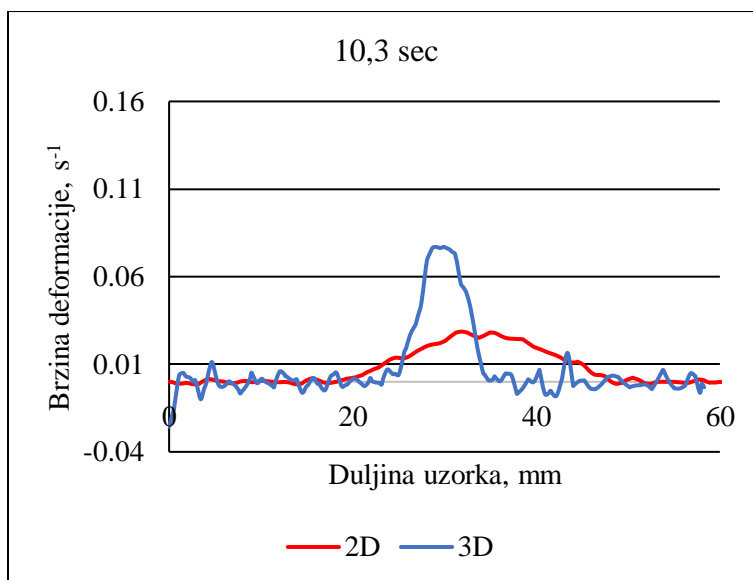


Slika 29. Linijska analiza iznosa deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 36,15 sekundi

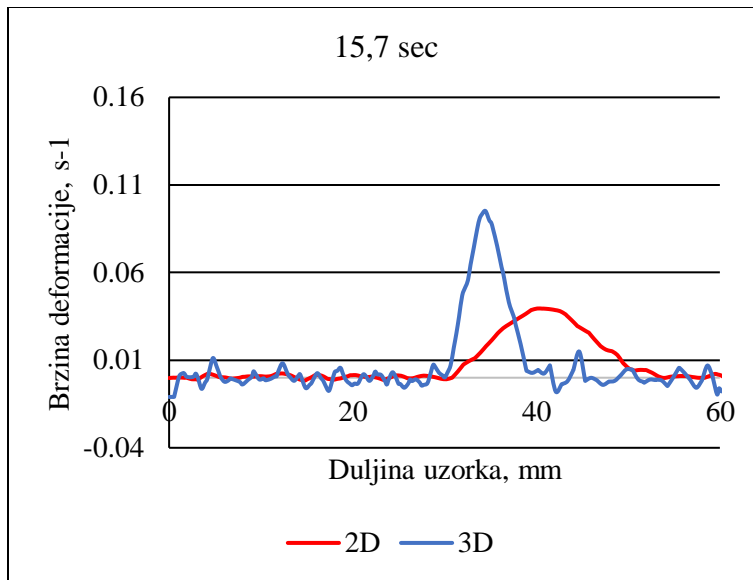




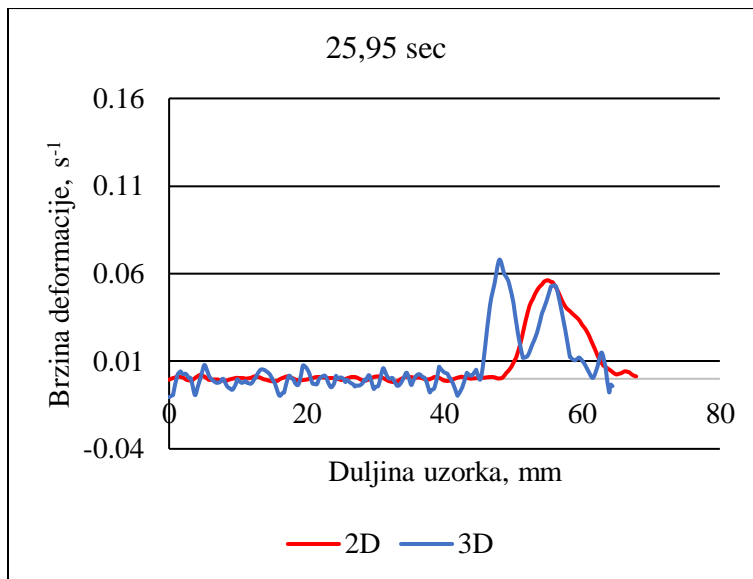
Slika 30. Linijska analiza iznosa brzine deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 0 sekundi



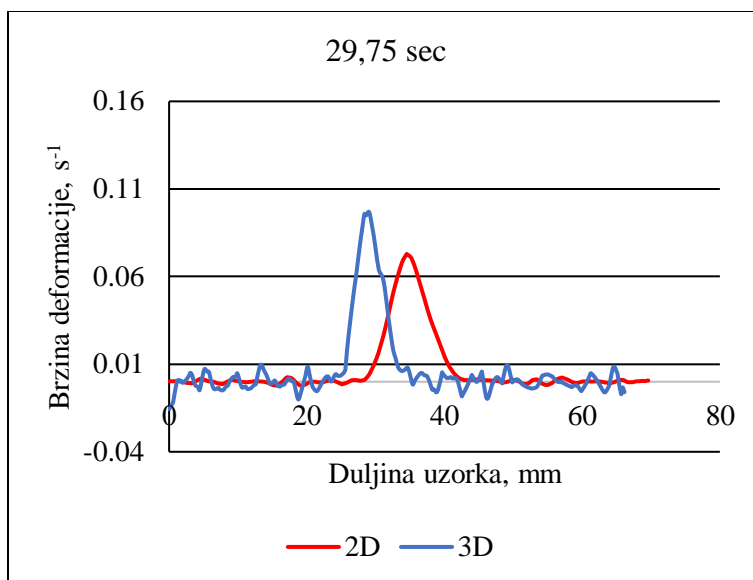
Slika 31. Linijska analiza iznosa brzine deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 10,3 sekundi



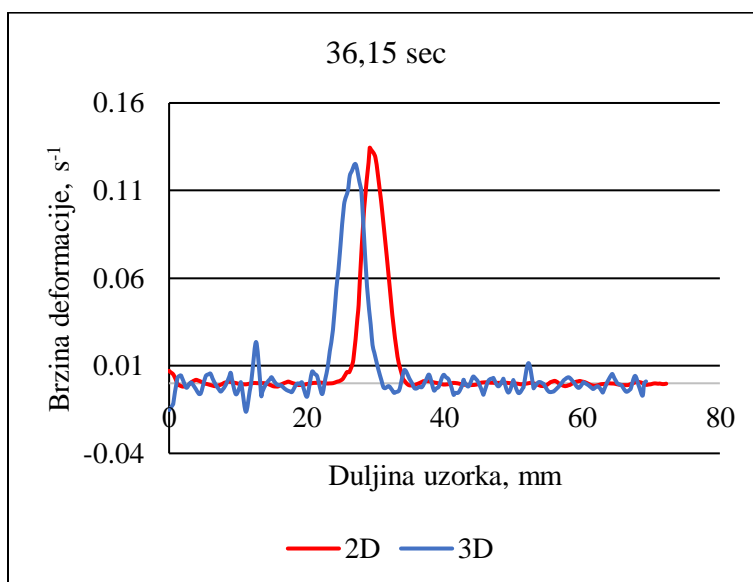
Slika 32. Linijska analiza iznosa brzine deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 15,7 sekundi



Slika 33. Linijska analiza iznosa brzine deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 25,29 sekundi



Slika 34. Linijska analiza iznosa brzine deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 29,75 sekundi



Slika 35. Linijska analiza iznosa brzine deformacije po dužini ispitnog uzorka pri 36,15 sekundi

Iz usporedbe rezultata, dobivenih kvantitativnom linijskom analizom, izmjerenih iznosa deformacija metodama 2D i 3D tijekom DIC ispitivanja utvrđeno je da se izmjerene iznose deformacija dobiveni 2D metodom vrlo dobro preklapaju s iznosima deformacija dobivenim 3D metodom po cijeloj dužini ispitnih uzoraka.

Na pojedinim dijelovima ispitnih uzoraka, odnosno dijelovima mjernog područja utvrđene su zanemarive razlike iznosa deformacija između 2D i 3D DIC metode, slike 24-29. Stoga se može zaključiti da ne postoji razlika u izmjerenim iznosima deformacija tijekom mjerenja 2D i 3D DIC metodom.

Jasno su uočljive razlike u izmjerenim vrijednostima brzine deformacije. Točnije, na slikama 31-33, jasno su vidljive razlike u izmjerenim vrijednostima.

U slučaju mjerenja promjene brzine deformacije, 3D DIC metoda pokazuje više izmjerene vrijednosti. To potvrđuje ranije analize promjene brzine deformacije tijekom cijelog perioda ispitivanja. Kako se eksperiment odvija, te se ostvari veći iznos ukupne deformacije, postupno razlika u promjeni brzine deformacije se smanjuje te se s obje metode mjere gotovo identični iznosi.

## 8. ZAKLJUČAK

Usporedbom kvalitativnih rezultata iznosa i raspodjele deformacija može se zaključiti da ne postoji razlika u iznosima deformacija dobivenih 2D i 3D DIC metodom.

Kvantitativnim rezultatima maksimalnih i srednjih vrijednosti iznosa deformacija mjernog područja ispitnih uzoraka utvrđeno je da ne postoji razlika u izmjenim iznosima i raspodjeli deformacija izmjerenih 2D i 3D metodom tijekom DIC ispitivanja. Detaljnija kvantitativna linijska analiza potvrdila je da na mjestima gdje je provedena linijska analiza nije utvrđena razlika u iznosima i raspodjeli deformacija dobivenih DIC metodama 2D i 3D.

Jasna razlika je uočena u određivanju raspodjele brzine deformacije po ispitnom dijelu uzoraka, gdje se korištenjem 3D DIC metode i analiziranjem kroz pripadajući programski paket, oštrije uočavaju mjesta većih iznosa brzina deformacije. To je jasno vidljivo kako iz kvantitativnih analiza i pripadajućih dijagrama, tako i iz kvalitativnih prikaza raspodjele brzine deformacije po ispitnom dijelu uzoraka.

Pri višim iznosima ostvarenih deformacija, razlike između rezultata analiza vršenih 2D i 3D metodom postepeno se smanjuju te se izmjerene vrijednosti brzina deformacije postupno izjednačavaju kod obje metode. Ovo je uočeno pri svim analizama vremenskih dijagrama promjene brzine deformacije.

Obzirom da su promjene brzina deformacije vrlo brzi procesi, može se zaključiti kako je 3D DIC metoda kod određivanja i praćenja brzina deformacija osjetljivija u odnosu na 2D DIC metodu.

## LITERATURA

- [1] S. Rešković, Osnove teorije oblikovanja deformiranjem, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2020.
- [2] B. Grizelj, Oblikovanje metala deformiranjem, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, Osijek, 2002.
- [3] <https://engineeringlibrary.org/reference/properties-of-metals-doe-handbook> (10.07.2023.)
- [4] M. Franz, Materijali I – 3. dio, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [5] <https://fractory.com/mechanical-properties-of-materials/> (10.07.2023.)
- [6] D. C. Stouffer, L. Thomas Dame, Inelastic Deformation of Metals Models, Mechanical Properties and Metallurgy, John Wiley & Son, Inc., Kanada, 1996.
- [7] <https://www.enggstudy.com/difference-between-edge-dislocation-and-screw-dislocation/> (10.07.2023.)
- [8] <https://www.corrosionpedia.com/definition/422/ductility> (10.07.2023.)
- [9] <https://www.wikiwand.com/sh/Duktilnost> (11.07.2023.)
- [10] B. Musafija, Obrada metala plastičnom deformacijom, Igkro “Svjetlost” Zavod za udžbenike, Sarajevo, 1970.
- [11] I. Vitez, M. Oruč, R. Sunulahpašić, Ispitivanje metalnih materijala, Univerzitet u Zenici, Fakultet za metalurgiju i metale, Zenica, 2006.
- [12] J. R. Davis, Tensile Testing, ASM International, Ohio, 2004.
- [13] <https://www.ispitivanje.com/staticke-kidalice-inspekt-duo/> (15.07.2023.)
- [14] D. Ćorić, Ž. Alar, Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstva materijala, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [15] S. Rešković, Ispitivanje materijala, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, 2018., Sisak
- [16] <https://eikosim.com/en/technical-articles/digital-image-correlation-the-basics/> (20.07.2023.)
- [17] M. Sutton, P. L. Reu, International Digital Imaging Correlation Society, Springer International Publishing, Switzerland, 2017.
- [18] S. W. Khoo, C. Tan, S. Karuppanan, A Review of Surface Deformation and Strain Measurement Using Two-Dimensional Digital Image Correlation, *Metrolog. Meas. Syst.*, Vol. 23 (2016), No. 3, pp. 461–480, 2016.
- [19] M. A. Sutton, J. J. Orteu, H. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*, 2009., 10.1007/978-0-387-78747-3
- [20] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6696109/> (20.07.2023.)
- [21] J. Zhao, Y. Sang, F. Duan, The state of the art of two-dimensional digital image correlation computational method, School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 2019.
- [22] D. Szczepanek, M. Malesa, and M. Kujawińska, 2D and 3D Digital Image Correlation Method and Its Application for Building Structural Elements' Investigation“, Institute of Micromechanics and Photonics, Warsaw University of Technology, Sw. A. Boboli St., 02-525 Warsaw, Poland, Pages 769-776, 2015.
- [23] J. C. Passieux, J. N. Perie, *Advances in Digital Image Correlation (DIC)*, Institut Clement Ader (ICAL), INSA Toulouse, France, 2020.
- [24] H. W. Schreier, M.A. Sutton, Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions, *Exp. Mech* 42 (2002) pp. 303-310.
- [25] D. Lorenzo, Full-field modal analysis using high-speed 3D digital image correlation, *J. Phys.:*

Conf. Ser. 1149 012007, 2018.

[26] C. Sciammarella, C. Furlong, L. Lamberti, M. A. Sutton, M. T. Lin, P. L. Reu, Advancement of Optical Methods & Digital Image Correlation in Experimental Mechanics, Volume 3, Springer, Switzerland, 2019.

[27] <https://www.correlatedsolutions.com/technology> (25.07.2023.)

[28] B. Wattrisse, A. Chrysochoos, J. M. Muracciole, M. Némoz-Gaillard, Kinematic manifestations of localisation phenomena in steels by digital image correlation, European Journal of Mechanics - A/Solids, 20 (2), pp.189-211, France, 2001.

[29] S. Yoshida, H. Ishii, K. Ichinose, K. Gomi, K. Taniuchi, An Optical Interferometric Band as an Indicator of Plastic Deformation Front, Journal of Applied Mechanics, 2005, 72 (5), 3 p. hal-01092667f

[30] S. V. Franklin, F. Mertens, M. Marder, Portevin-Le Chatelier effect, Physical Review E, Center for Nonlinear Dynamics and Department of Physics, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, 2000

[31] T. D. Nguyen, J. Hopkins, B. J. Murienne, A comparison of 2D and 3D digital image correlation for a membrane under inflation, Department of Mechanical Engineering, University, Baltimore, US, 2016.

[32] <https://www.zwickroell.com/news-events/news/how-effective-is-2d-dic-in-materials-testing/> (02.08.2023.)

[33] <https://www.nextthoughtstudios.com/video-production-blog/2d-graphics-vs-3d-graphics-which-is-more-effective> (02.08.2023.)

# ŽIVOTOPIS

## OSOBNİ PODACI:

Ime i prezime: Doris Ljiljak

Datum i mjesto rođenja: 04.05.2001., Sisak

Adresa: Ulica Ruđera Boškovića 77, Mošćenica

Telefon: 099 3711 364

E-mail: dorisljiljak@gmail.com

## OBRAZOVANJE:

2020. - 2023. - Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija, smjer Industrijska ekologija

2016. - 2020. - Tehnička škola Sisak, smjer Ekološki tehničar

2007. - 2016. - Osnovna škola Braće Bobetko, Sisak

## RADNO ISKUSTVO:

2023. - Applied Ceramics d.o.o (stručna praksa)

2022. - Wolt (studentski posao)

2022. - caffe bar Top Tale (studentski posao)

2021. - Bojana instalacije j.d.o.o. (studentski posao)

## OSOBNİ VJEŠTINE:

Rad na računalu

Strani jezik: engleski

Vozački ispit: B kategorija