

# Mjerenje izvan ravninskih pomaka i deformacija uslijed smičnog opterećenja primjenom stereo korelacije digitalne slike

---

Vinčić, Petra

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:192032>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-04**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Petra Vinčić**

Zagreb, 2019. godine

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Doc. dr. sc. Zvonimir Tomičević

Petra Vinčić

Zagreb, 2019. godine

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

Zahvaljujem se svojem mentoru doc.dr.sc. Zvonimiru Tomičeviću na izvrsnom mentorstvu, razumijevanju, strpljenju, korisnim savjetima te uloženom trudu i vremenu kako bi mi pomogao izraditi ovaj završni rad.

Također se zahvaljujem svojem prijatelju i kolegi Andriji Zaplatiću na pomoći oko pripreme eksperimenta i pružanju korisnih savjeta pri pisanju ovog rada.

Iznimno se zahvaljujem svojoj obitelji na omogućenom studiranju te ukazanom strpljenju i podršci. Također se zahvaljujem svojem dečku Marijanu na neprestanoj motivaciji, ohrabivanju i podršci koja mi je uveliko olakšala studiranje. Veliko hvala i svim ostalim prijateljima i kolegama koji su mi uljepšali ovaj preddiplomski studij.

Petra Vinčić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa:   |        |
| Ur.broj:   |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Petra VINČIĆ**

Mat. br.: 0035194862

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Mjerenje izvan ravninskih pomaka i deformacija uslijed smičnog opterećenja primjenom stereo korelacije digitalne slike**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Measurement of out-of plane displacement and deformation due to shear load using stereo correlation of digital image**

Opis zadatka:

Tijekom zadnja dva desetljeća znatan napor je uložen u razvoj odgovarajućeg uzorka i konfiguracije opterećenja za određivanje smične deformacije. S obzirom na vrstu materijala i tehnike mjerenja deformacija primjenjivali su se različiti prihvat. Materijali s izrazitom plastičnom deformacijom uobičajeno su se testirali na Iosipescu smičnom prihvatnom te uvijanjem tankostijenih cijevi, dok su se anizotropni i heterogeni materijali (drvo i kompoziti) ispitivali Arcan test metodom. Razvojem naprednih optičkih tehnika mjerenja polja pomaka i deformacija može se zanemariti kriterij za odabir metode ispitivanja smične deformacije, budući se uzima u obzir cijela površina ispitnog uzorka. Provođenjem numeričkih simulacija s Arcan prihvatom uočen je fenomen gužvanja materijala ispitnog uzorka, odnosno zabilježeni su izvan ravninski pomaci i deformacije u vrhovima V zarezata leptiraste epruvete.

U ovom radu je potrebno odrediti izvan ravninske pomake i deformacije na uskom dijelu leptirastog uzorka kod smičnog opterećenja primjenom optičkog mjernog sustava Aramis. Ispitivanja provesti na leptirastim ispitnim uzorcima različitih debljina pravokutnog oblika sa simetričnim V zarezima u sredini.

Tijekom rada potrebno je:

1. Upoznati se s radom statičke kralice i optičkog mjernog sustava Aramis.
2. Odrediti polje pomaka i deformacija na ispitnim uzorcima različitih debljina uslijed smičnog opterećenja.
3. Analizirati ovisnost izvan ravninskih pomaka i deformacija leptirastog ispitnog uzorka s obzirom na debljinu epruvete i visinu ligamenta između dva V zarezata.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Rok predaje rada:

1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Zvonimir Tomičević

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

**SADRŽAJ**

|  |     |
|--|-----|
| SADRŽAJ .....  | I   |
| POPIS SLIKA .....  | II  |
| POPIS TABLICA .....  | IV  |
| POPIS OZNAKA .....   | V   |
| SAŽETAK .....  | VII |
| SUMMARY .....  | IX  |
| 1. UVOD .....  | 1   |
| 2. ISPITIVANJE SMIČNIH DEFORMACIJA .....   | 3   |
| 2.1. Čisti i jednostavni smik .....  | 4   |
| 2.2. Iosipescu ispitni uređaj .....  | 6   |
| 2.3. Arcan prihvati .....  | 8   |
| 2.4. Uvijanje štapova različitog poprečnog presjeka .....                          | 9   |
| 3. METODA KORELACIJE DIGITALNE SLIKE .....   | 14  |
| 3.1. Princip rada .....  | 14  |
| 3.2. Kros-korelacijska funkcija .....  | 17  |
| 3.3. Tipovi algoritama .....   | 19  |
| 3.4. Priprema ispitnog uzorka .....  | 20  |
| 3.5. Kamera, leće, osvjetljenje .....  | 20  |
| 3.6. Kalibracija .....   | 21  |
| 4. NUMERIČKA ANALIZA .....   | 23  |
| 5. PROVEDBA EKSPERIMENTA .....   | 27  |
| 5.1. Mehanički postav Arcan test metode .....                                      | 27  |
| 5.2. Ispitni uzorak .....  | 28  |
| 5.3. Optički postav .....  | 29  |
| 6. REZULTATI .....   | 32  |
| 6.1. Analiza rezultata mjerenja cijelog polja pomaka za uzorak debljine 1 mm ..... | 33  |
| 6.2. Analiza rezultata mjerenja cijelog polja pomaka za uzorak debljine 2 mm ..... | 39  |
| 6.3. Analiza rezultata mjerenja cijelog polja pomaka za uzorak debljine 3 mm ..... | 45  |
| 6.4. Analiza rezultata mjerenja cijelog polja pomaka za uzorak debljine 4 mm ..... | 52  |
| 7. DISKUSIJA .....   | 60  |
| 8. ZAKLJUČAK .....   | 63  |
| LITERATURA .....   | 66  |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 2.1. Primjer smičnog opterećenja [4] .....   | 3  |
| Slika 2.2. Čisto smicanje: a) glavna naprezanja, b) deformirani element, c) Mohrova kružnica [5] .....   | 5  |
| Slika 2.3. Jednostavni smik [3] .....  | 5  |
| Slika 2.4. Primjer: a) čistog i b) jednostavnog smika [6] .....  | 6  |
| Slika 2.5. Iosipescu ispitni uređaj [7] .....  | 6  |
| Slika 2.6. Iosipescu ispitni uzorak: a) prikaz opterećenja, b) dijagram poprečnih sila, c) momentni dijagram [8] .....   | 7  |
| Slika 2.7. Dijagram deformacija po duljini presjeka .....  | 8  |
| Slika 2.8. Mogućnosti opterećenja kod Arcan prihvata [10] .....  | 9  |
| Slika 2.9. Uvijanje štapa okruglog presjeka i prikaz diferencijalnog elementa [11] .....   | 10 |
| Slika 2.10. Raspored tangencijalnog naprezanja pri uvijanju štapa: a) kružnog poprečnog presjeka, b) poprečnog presjeka u obliku kružnog vijenca .....   | 10 |
| Slika 2.11. Štap okruglog presjeka opterećen na uvijanje: a) Mohrova kružnica, b) nastanak loma [11] .....   | 11 |
| Slika 2.12. Uvijanje tankostijene cijevi [12] .....  | 12 |
| Slika 3.1. Prikaz procesa metode korelacije digitalne slike u tri koraka [13] .....  | 14 |
| Slika 3.2. Pojednostavljeni prikaz analize metode korelacije digitalne slike: a) definicija referentne teksture, b) fasete, c) središta fasete, d) deformirana referentna tekstura, e) izračun vektora pomaka [13] ..... | 15 |
| Slika 3.3. Vlačni test: a) definicija referentne teksture, b) pronalazak deformirane fasete, c) korelacija pomaka [13] .....   | 16 |
| Slika 3.4. Procedura podudaranja slika kod stereo DIC-a [14] .....   | 16 |
| Slika 3.5. Prikaz: a) referentne slike, b) matrice referentne slike, c) deformirane slike, d) matrice deformirane slike [15] .....   | 18 |
| Slika 3.6. Prikaz fasete na referentnoj matrici uz deformiranu matricu [15] .....  | 19 |
| Slika 3.7. Usporedba 2-D i stereo korelacije digitalne slike sa korelacijom digitalnog volumena [13] .....   | 19 |
| Slika 3.8. Gustoća teksture [13] .....   | 20 |
| Slika 3.9. Prikaz: a) 2D kalibracije sustava, b) stereo DIC kalibracije sustava [13] .....   | 22 |
| Slika 4.1. Arcan prihvati: a) dijelovi prihvata, b) presjek [2] .....  | 23 |
| Slika 4.2. Proračunski model prihvata [2] .....  | 24 |
| Slika 4.3. Prikaz a) naprezanja prema von Misesu, b) deformacija [2] .....   | 24 |
| Slika 4.4. Prikaz a) ukupnih pomaka, b) pomaka u smjeru y osi, c) pomaka u smjeru x osi, d) pomaka u smjeru z osi [2] .....  | 25 |
| Slika 4.5. Prikaz pomaka po osi y te gužvanja materijala [2] .....   | 25 |
| Slika 5.1. Arcan prihvati postavljen za smično opterećenje .....   | 27 |
| Slika 5.2. Dimenzije ispitnog uzorka [16] .....  | 28 |
| Slika 5.3. Ispitni uzorci: a) prije nanošenja rastera, b) nakon nanošenja rastera .....  | 28 |
| Slika 5.4. Prikaz: a) kalibracije sustava, b) mjernog objekta veličine 55x44 mm .....  | 29 |
| Slika 5.5. Postavljanje optičkog sustava za ispitivanje .....  | 30 |
| Slika 5.6. Veličina mjerenog područja korištenjem mjernog objekta veličine 55x44 mm .....  | 30 |
| Slika 5.7. Veličina mjerenog područja korištenjem mjernog objekta veličine 90x72 mm .....  | 31 |
| Slika 6.1. Prikaz odabranih točaka na nedeformiranom uzorku za analizu rezultata: a) lijeva kamera, b) desna kamera .....  | 32 |
| Slika 6.2. Koordinatni sustav .....  | 33 |
| Slika 6.3. Polje smičnih deformacija $\epsilon_{xy}$ kod uzorka debljine 1 mm. Deformacija je izražena kao bezdimenzijska veličina. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od: .....                                | 34 |

|  |    |
|--|----|
| Slika 6.4. Promjena smanjenja debljine uzorka s obzirom na povećanje narinutog opterećenja kod ispitnog uzorka debljine 1 mm.....  | 35 |
| Slika 6.5. Promjena polja pomaka u smjeru osi z s obzirom na povećanje narinutog opterećenja kod uzorka debljine 1 mm. ....  | 37 |
| Slika 6.6. Deformirani ispitni uzorak debljine 1 mm.....   | 38 |
| Slika 6.7. Polje smičnih deformacija $\epsilon_{xy}$ kod uzorka debljine 2 mm. Deformacija je izražena kao bezdimenzijska veličina. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od: .....  | 40 |
| Slika 6.8. Promjena smanjenja debljine uzorka s obzirom na povećanje narinutog opterećenja kod ispitnog uzorka debljine 2 mm.....  | 42 |
| Slika 6.9. Promjena polja pomaka u smjeru osi z s obzirom na povećanje narinutog opterećenja kod uzorka debljine 2 mm. ....  | 44 |
| Slika 6.10. Deformirani ispitni uzorak debljine 2 mm.....  | 45 |
| Slika 6.11. Polje smičnih deformacija $\epsilon_{xy}$ kod uzorka debljine 3 mm. Deformacija je izražena kao bezdimenzijska veličina. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od: ..... | 47 |
| Slika 6.12. Promjena smanjenja debljine uzorka s obzirom na povećanje narinutog opterećenja kod ispitnog uzorka debljine 3 mm.....   | 49 |
| Slika 6.13. Promjena polja pomaka u smjeru osi z s obzirom na povećanje narinutog opterećenja kod uzorka debljine 3 mm. ....   | 51 |
| Slika 6.14. Deformirani ispitni uzorak debljine 3 mm [16].....   | 52 |
| Slika 6.15. Polje smičnih deformacija $\epsilon_{xy}$ kod uzorka debljine 4 mm. Deformacija je izražena kao bezdimenzijska veličina. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od: ..... | 54 |
| Slika 6.16. Promjena smanjenja debljine uzorka s obzirom na povećanje narinutog opterećenja kod ispitnog uzorka debljine 4 mm.....   | 56 |
| Slika 6.17. Promjena polja pomaka u smjeru osi z s obzirom na povećanje narinutog opterećenja kod uzorka debljine 4 mm. ....   | 58 |
| Slika 6.18. Deformirani ispitni uzorak debljine 4 mm.....  | 59 |
| Slika 7.1. Prikaz dijagrama ovisnosti: a) smične deformacije o naprezanju, b) ekvivalentne deformacije o naprezanju .....  | 60 |
| Slika 7.2. Dijagram naprezanja i smanjenja debljine leptirastog ispitnog uzorka u različitim točkama (Slika 6.1.).....   | 62 |
| Slika 7.3. Prikaz izvijanja uzoraka debljine: a) 1 mm, b) 2 mm.....  | 62 |



## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 6.1. Vrijednosti karakterističnih izmjerenih veličina kod smičnog mehaničkog ispitivanja za ispitni uzork debljine 1 mm .....  | 38 |
| Tablica 6.2. Vrijednosti karakterističnih izmjerenih veličina kod smičnog mehaničkog ispitivanja za ispitni uzork debljine 2 mm. ....  | 44 |
| Tablica 6.3. Vrijednosti karakterističnih izmjerenih veličina kod smičnog mehaničkog ispitivanja za ispitni uzorak debljine 3 mm. .... | 52 |
| Tablica 6.4. Vrijednosti karakterističnih izmjerenih veličina kod smičnog mehaničkog ispitivanja za ispitni uzork debljine 4 mm .....  | 59 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka             | Jedinica        | Opis                                       |
|--------------------|-----------------|--|
| $A_{sr}$           | mm <sup>2</sup> | Površina poprečnog presjeka                |
| $b$                | mm              | Visina uzorka                              |
| $C$                | -               | Korelacijski koeficijent                   |
| $d_i$              | mm              | Unutarnji promjer                          |
| $d_e$              | mm              | Vanjski promjer                            |
| $E$                | GPa             | Youngov modul elastičnosti                 |
| $F$                | N               | Sila                                       |
| $f(x_i, y_j)$      | -               | Intenzitet sive boje na referentnoj faseti |
| $G$                | GPa             | Coulombov modul smicanja                   |
| $g(x'_i, y'_j)$    | -               | Intezitet sive boje na deformiranoj faseti |
| $h$                | mm              | Debljina stjenke                           |
| $I_p$              | mm <sup>4</sup> | Polarni moment tromosti                    |
| $K$                | GPa             | Volumenski (obujamni) modul elastičnosti   |
| $M_t, M$           | Nmm             | Torzijski moment                           |
| $p_i$              | MPa             | Unutarnji tlak                             |
| $p_e$              | MPa             | Vanjski tlak                               |
| $R$                | mm              | Polumjer štapa                             |
| $R_e$              | mm              | Vanjski radijus                            |
| $R_i$              | mm              | Unutarnji radijus                          |
| $r$                | mm              | Srednji promjer                            |
| $t$                | mm              | Širina uzorka                              |
| $T$                | Nmm             | Unutarnji moment torzije                   |
| $TR$               | -               | Smanjenje zadebljanja u točki              |
| $x_i, y_j$         | -               | Koordinate točke na referentnoj faseti     |
| $x'_i, y'_j$       | -               | Koordinate točke na deformiranoj faseti    |
| $\varepsilon_{xy}$ | %               | Smična deformacija                         |
| $\gamma$           | -               | Kutna deformacija                          |

---

|  |                   |                                |
|--|-------------------|--------------------------------|
| $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ | N/mm <sup>2</sup> | Normalno naprezanje            |
| $\sigma_{xy}$  | N/mm <sup>2</sup> | Posmično naprezanje            |
| $\sigma_1, \sigma_2$                                     | N/mm <sup>2</sup> | Glavno naprezanje              |
| $\rho$   | mm                | Radijus                        |
| $\tau_{sr}$  | N/mm <sup>2</sup> | Srednje posmično naprezanje    |
| $\tau, \tau_{xy}, \tau_{\theta x}, \tau_{x\theta}$       | N/mm <sup>2</sup> | Tangencijalno naprezanje       |
| $\tau_{\max}$  | N/mm <sup>2</sup> | Maksimalno posmično naprezanje |
| $\tau_{\min}$  | N/mm <sup>2</sup> | Minimalno posmično naprezanje  |
| $\nu$  | -                 | Poissonov koeficijent          |

## SAŽETAK

Određivanje mehaničkih svojstava materijala pri jednostavnom i složenom opterećenju od velike je važnosti budući da je većina inženjerskih konstrukcija tijekom eksploatacije podvrgnuta kompleksnim režimima opterećenja. Cilj eksperimentalnih ispitivanja je identifikacija mehaničkih parametara materijala kako bi se pouzdanije opisalo ponašanje materijala i procijenio životni vijek konstrukcije. Postojeće metode za ispitivanje materijala na smik unazad nekoliko godina se konstantno modificiraju jer se uz smik na ispitnim uzorcima pojavljuje i efekt izvan ravninskog savijanja. Najpoznatije metode mehaničkih smičnih ispitivanja provode se na Iosipescu i Arcan prihvatu. Obje test metode koriste leptiraste ispitne uzorke s dva V zarez (eng. *butterfly specimen*) kako bi se između njih postiglo ujednačeno stanje smicanja. Osim toga, kako bi se odredilo ponašanje materijala uslijed smičnog opterećenja provode se mehanički eksperimenti uvijanja štapova okruglog ili pravokutnog presjeka.

U ovom radu je provedeno ispitivanje leptirastih uzoraka na jednoosnoj elektromehaničkoj kidalici Beta 50-5 (Messphysik Austrija). Smično opterećenje je na ispitni uzorak preneseno pomoću modificiranog višeosnog Arcan prihvata. Cilj ovog rada je odrediti izvan ravninske pomake i deformacije na uzorcima različitih debljina. Za predložena ispitivanja su korišteni uzorci debljina 1, 2, 3 i 4 mm izrađeni od konstrukcijskog čelika DC01. Polja pomaka i deformacija na površini uzorka izmjerena su metodom korelacije digitalne slike. Za određivanje izvan ravninskih polja pomaka i deformacija korišten je stereo optički mjerni sustav Aramis koji na temelju korelacijskog algoritma uspoređuje sliku zabilježenu u referentnoj konfiguraciji s nizom slika površine ispitnog uzorka u deformiranoj konfiguraciji. Primjenom predloženog mehaničkog i optičkog postava izračunati su pomaci i deformacije u promatranoj zoni interesa (tj. između dva V zarez).

Za svaki ispitni uzorak je izmjereno i analizirano polje smičnih deformacija, promjena debljine uzorka odnosno gužvanje materijala te polje pomaka u smjeru okomitom na promatranu površinu ispitnog uzorka. Povezivanjem podatka zabilježenih na jednoosnoj kidalici i izmjerenih polja pomaka i/ili deformacija metodom korelacije digitalne slike određen je dijagram ovisnosti smične deformacije i naprezanja. Osim toga, zabilježeni su dijagrami ovisnosti promjene debljine uzorka o naprezanju u karakterističnim mjernim točkama.

**Ključne riječi:** Arcan test metoda, leptirasti uzorak, gužvanje materijala, metoda korelacije digitalne slike, optički mjerni sustav Aramis.

## SUMMARY

Determining the mechanical properties of materials at simple and multiaxial loading is of great importance since most of the engineering structures are subjected to the complex loading regimes during their exploitation. The aim of the experimental investigation is to identify the mechanical parameters of the material in order to describe material response in a more reliable way and consequently evaluate the lifetime of the constructions. The existing experimental methods for mechanical investigation when the sample is subjected under shear loading have been constantly modified in the last few years because an additional out of plane bending effect was noted. The most known methods of mechanical shear testing are conducted on the Iosipescu and Arcan rigs. The latter test methods use butterfly specimen with two symmetrical V notches in order to achieve an uniform shear state. Furthermore, in order to access the material behaviour under shear loading regime can be achieved by applying torsion to the circular or rectangular bars.

In this work, the experimental investigation was performed on butterfly samples. The mechanical tests have been conducted on the uniaxial Beta 50-5 testing machine (Messphysik Austria). The shear loading was carried on the test sample via modified multiaxial Arcan rig. The aim of this thesis is to determine the out of plane displacements and strains occurring on the butterfly specimens with different thicknesses. For the proposed investigation, samples with 1, 2, 3 and 4 mm thicknesses were made of DC01 constructional steel. The displacement and strain fields were measured by digital image correlation method on the surface of the sample. A stereo optical measuring system Aramis was used to measure the out of plane displacements. The proposed commercial measuring system compares the image of the region of interest taken in the reference configuration with a series of images captured in the deformed configuration. Aramis measuring system is based on the correlation algorithm. The displacement and strain fields of the observed, between the two V notches, were calculated using the proposed mechanical and optical setup.

Shear strain field, change of thickness of the sample or (*i.e.* the material wrinkling ) and the displacement field in the perpendicular direction of the observed surface region were measured and analyzed for the four test samples. Shear stress and strain relation was determined coupling the data reported on the uniaxial testing machine and the measured

displacement and strain fields is determined. Moreover, the relation of the change of thickness and shear stress are reported for the characteristic measuring points.

**Keywords:** Arcan Rig, Butterfly Specimen, Material Wrinkling, Digital Image Correlation Method, Aramis Optical Measuring System.

## 1. UVOD

Unazad nekoliko desetljeća razvijaju se napredne eksperimentalne metode pomoću kojih se određuje ponašanje materijala uslijed jednostavnih i složenih opterećenja. Predložena istraživanja za cilj imaju identifikaciju mehaničkih parametara materijala elastoplastičnih konstitutivnih zakona primjenom eksperimentalno numeričkih metoda spajajući tehnike mjerenja cijelog polja pomaka i numeričkih simulacija. Izmjereni parametri materijala koristit će se kod proračuna realnih inženjerskih konstrukcija, a rezultat će pouzdanijom procjenom njihovog vijeka trajanja. Eksperimentalna istraživanja su vrlo zahtjevna budući da je potrebno poštovati procedure pripreme i provedbe ispitivanja. S ciljem postizanja veće osjetljivosti parametara materijala s obzirom na eksperimentalnu metodu unaprjeđuju se eksperimentalni prihvat i ispitni uzorci. Pregledom literature utvrđeno je kako dosadašnja eksperimentalna ispitivanja inženjerskih materijala na smik konstantno rezultiraju modificiranjem postojećih prihvata i optimizacijom ispitnih uzoraka jer se uslijed smičnog opterećenja na ispitnim uzorcima javlja i savijanje. Ukoliko su deformacije uzrokovane savijanjem puno manje od posmičnih deformacija ono se može zanemariti. Glavni problem pri ispitivanju na smik je da su posmična naprezanja prilično nejednolično raspoređena na mjerenom poprečnom presjeku.

Za mjerenje posmičnih deformacija najčešće se primjenjuju Iosipescu i Arcan prihvat kod kojih se ispitivanja provode na uzorcima s dva simetrična V zarezna na sredini ispitnog uzorka. Osim toga posmične deformacije moguće je odrediti uvijanjem štapova okruglog ili pravokutnog poprečnog presjeka. Dosadašnja ispitivanja inženjerskih materijala s izrazitom plastičnom deformacijom provedena su primjenom Iosipescu prihvata te uvijanjem tankostjenih cijevi dok je Arcan prihvat korišten za ispitivanje anizotropnih i heterogenih materijala. Zbog unaprjeđenja optičkih metoda mjerenja cijelog polja pomaka i/ili deformacija može se zanemariti kriterij odabira metode ispitivanja budući da se promatra cijela zona interesa ispitnog uzorka.

Cilj ovog rada je izmjeriti izvan ravninske pomake i deformacije na leptirastom ispitnom uzorku pomoću optičkog mjernog sustava Aramis. Ispitivanja će se provesti na uzorcima različitih debljina kako bi se analizirala ovisnost izvan ravninskih pomaka i deformacija s obzirom na debljinu ispitnog uzorka. U ovom radu koristit će se modificirani višeosni Arcan



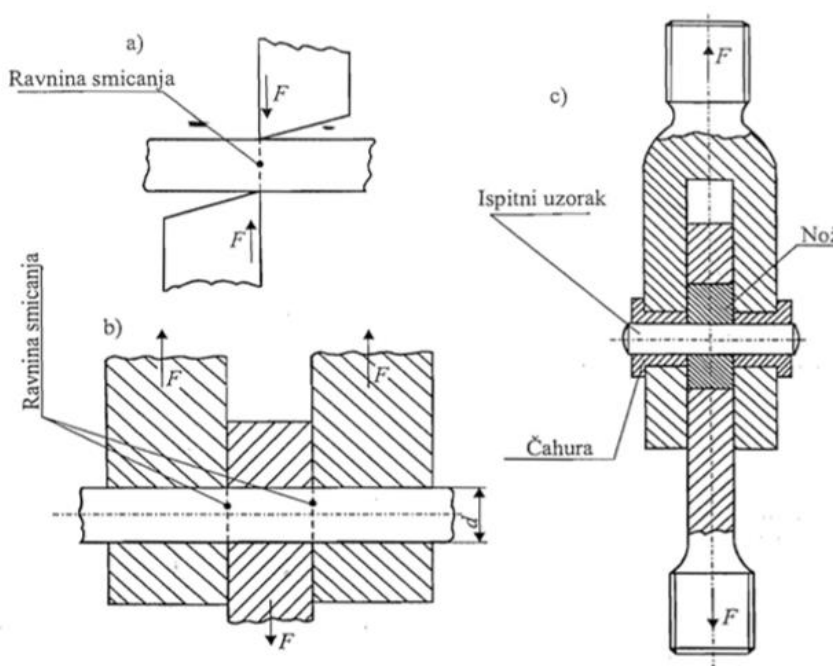
prihvat [1, 2], a ispitivanja će biti provedena na jednoosnoj elektromehaničkom ispitnom uređaju kidalici. Ispitivat će se uzorci izrađeni od konstrukcijskog čelika DC01.

Odziv materijala uslijed narinutog opterećenja moguće je odrediti pomoću kontaktnih i/ili beskontaktnih metoda mjerenja pomaka i/ili deformacija ovisno o vrsti materijala te načinu prenošenja opterećenja na ispitni uzorak. U ovom radu ponašanje materijala promatrat će se korištenjem metode korelacije digitalne slike. Tijekom provedbe mehaničkog eksperimenta zabilježavaju se digitalne slike koje obuhvaćaju zonu interesa. Predložena mjerna tehnika koristi prirodnu teksturu materijala ili umjetno nanese raster na površinu ispitnog uzorka. Primjenom kros korelacijske funkcije DIC algoritam uspoređuje sliku zabilježenu u referentnoj konfiguraciji (tj. u neopterećenom stanju ispitnog uzorka) sa slikama u deformiranoj konfiguraciji (u opterećenom stanju ispitnog uzorka). Na temelju toga korelacijski algoritam određuje pomake i deformacije na površini uzorka.

Osim uvodnog poglavlja ovaj rad sadrži još sedam poglavlja. U drugom poglavlju su navedeni načini ispitivanja smičnih deformacija. Objasnjeno je kako funkcioniraju Iosipescu ispitni uređaj te Arcan prihvat. Također u tom poglavlju je opisano ispitivanje materijala na smik uvijanjem cijevi te štapova. U trećem poglavlju opisan je princip rada metode korelacije digitalne slike te su objašnjeni tipovi algoritama, korelacijska funkcija, način pripreme ispitnog uzorka, oprema i kalibracija sustava. Četvrto poglavlje sadrži numeričku analizu leptirastog uzorka pri smičnom opterećenju u programskom paketu *Abaqus*. Prikazana su naprezanja po von Misesu, tangencijalna naprezanja u korijenu zareza i pomaci u smjeru svih osi uzorka. U petom poglavlju objašnjeno je kako je proveden eksperiment. Navedeni su svi dijelovi prihvata, opisani su ispitni uzorci i njihova priprema za ispitivanje te je opisan optički postav. U šestom poglavlju prikazana je analiza rezultata mjerenja polja pomaka i deformacija za sve uzorke, dok je u sedmom poglavlju provedena diskusija s obzirom na gužvanje materijala.

## 2. ISPITIVANJE SMIČNIH DEFORMACIJA

Smik ili odrez je opterećenje čvrstoga tijela silama koje djeluju u ravnini nekoga presjeka tijela, a nastoje izazvati paralelno klizanje jednoga dijela presjeka (tankoga sloja) u odnosu na drugi [3]. Ispitivanje na smik može se provoditi na jednoj ili dvije ravnine smicanja (Slika 2.1.a) i b)). Vlačnim ispitivanjem na kidalici opterećenje se prenosi s kidalice na nož i uzorak u jednom smjeru te na čahuru i uzorak u drugom smjeru (Slika 2.1.c)). Na taj način se dobiva opterećenje na smik u dvije ravnine smicanja.



Slika 2.1. Primjer smičnog opterećenja [4]

Ispitivanja na smik se provode sa svrhom određivanja smične čvrstoće i modula smicanja nekog materijala. Smična čvrstoća je maksimalni iznos smičnog opterećenja koje materijal može izdržati prije pojave loma. Identifikacija posmičnih parametara materijala provodi se na vijcima, zaticima, zavarima, profilima i limovima jer su u realnim inženjerskim konstrukcijama ti dijelovi najčešće opterećeni na smik. U praksi je teško točno proračunati konstrukcijske komponente opterećene smikom tako da se određuje srednje posmično naprezanje  $\tau_{sr}$  pomoću jednadžbe

$$\tau_{sr} = \frac{F}{A_{sr}}, \quad (1)$$

gdje je  $A_{sr}$  površina presjeka koji sudjeluje u smicanju. Kutna deformacija  $\gamma$  može se dobiti preko tangencijalnog naprezanja pomoću izraza

$$\tau = \gamma G, \quad (2)$$

u kojem oznaka  $G$  predstavlja Coulombov modul smicanja ili modul klizanja koji ovisi o materijalu. Izraz za modul smicanja glasi

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (3)$$

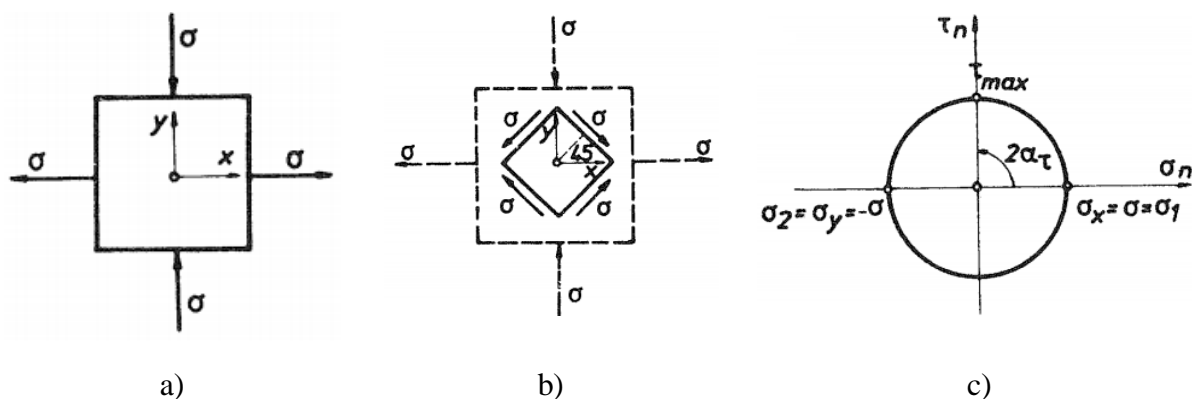
gdje je  $E$  Youngov modul elastičnosti, a  $\nu$  Poissonov omjer. Modul smicanja  $G$  zajedno s Youngovim modulom elastičnosti  $E$ , Poissonovim koeficijentom  $\nu$  i obujamnim (volumenskim) modulom elastičnosti  $K$  čini konstante elastičnosti koje karakteriziraju elastična svojstva materijala.

## 2.1. Čisti i jednostavni smik

Koncepti čistog i jednostavnog smicanja poznati su u mehanici kontinuuma. Za male deformacije ta se stanja razlikuju samo u rotaciji budući da koncept čistog smicanja ne uključuje rotaciju krutog tijela. Međutim, korelacija između njih nije dobro definirana u slučaju velikih deformacija.

Čisto smicanje je ravninsko stanje naprezanja kod kojeg je  $\sigma_{xx} = -\sigma_{yy} = \sigma$  i  $\sigma_{xy} = 0$  kao što je prikazano na slici 2.2.a). Stoga su glavne osi naprezanja u ovom slučaju definirane kao  $\sigma_1 = \sigma$  i  $\sigma_2 = -\sigma$ . Na slici 2.2.b) je prikazan deformirani element na čijim stranicama djeluje maksimalno posmično naprezanje. Iz slike 2.2.c) na kojoj se nalazi Mohrova kružnica možemo dobiti izraze za maksimalno posmično naprezanje koje glasi

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2). \quad (4)$$



Slika 2.2. Čisto smicanje: a) glavna naprezanja, b) deformirani element, c) Mohrova kružnica [5]

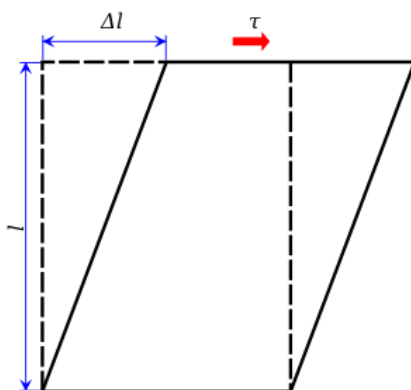
Također iz Mohrove kružnice je vidljivo da je normalno naprezanje jednako nuli:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) = 0. \quad (5)$$

Jednostavni smik je opterećenje tijela silama u ravnini nekog presjeka tog tijela izazivajući klizanje jednog presjeka u odnosu na drugi. Na slici 2.3. je prikazana shema jednostavnog smika. Na gornji lijevi vrh pravokutnika djeluje sila koja gornju stranicu pomiče paralelno u odnosu na donju. Posmično naprezanje koje se javlja na gornjoj i donjoj stranici paralelograma se računa prema izrazu

$$\tau = \frac{F}{A}, \quad (6)$$

gdje je  $F$  sila koja opterećuje tijelo, a  $A$  je površina stranice koja je paralelna sa silom  $F$ .



Slika 2.3. Jednostavni smik [3]

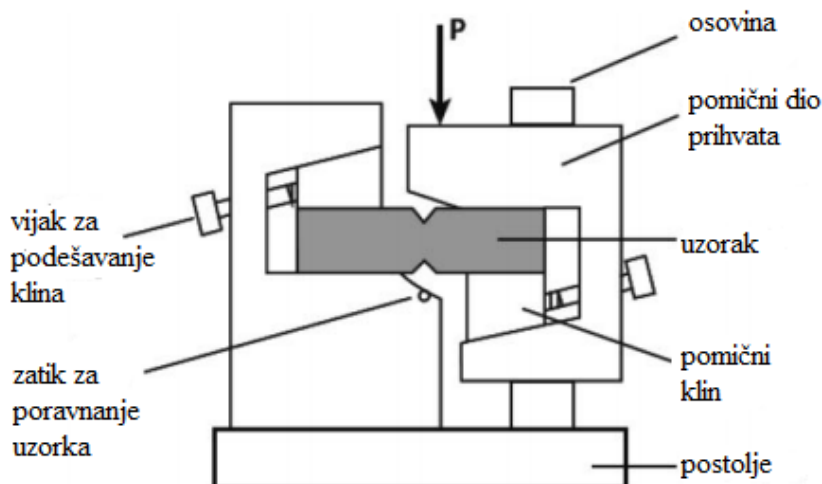
Razlika između čistog i jednostavnog smika može se uočiti promatrajući sliku 2.4. gdje je prikazan čisti smik i jednostavni smik. Kod čistog smika se tangencijalno naprezanje javlja na svim stranicama elementarnog volumena (Slika 2.4.a)), dok se kod jednostavnog smika tangencijalno naprezanje javlja samo na dvjema stranicama koje se paralelno pomiču (Slika 2.4.b)).



Slika 2.4. Primjer: a) čistog i b) jednostavnog smika [6]

## 2.2. Iosipescu ispitni uređaj

Iosipescu test metoda razvijena je u ranim 60-tim godinama prošlog stoljeća i koristila se za određivanje ponašanja izotropnih materijala uslijed smičnog opterećenja ispitnog uzorka. Unaprjeđenjem eksperimentalnog Iosipescu prihvata omogućeno je da se danas s njim mogu provoditi ispitivanja na ortotropnim materijalima. Za provođenje ovog mehaničkog ispitivanja koristi se greda pravokutnog poprečnog presjeka. Dva simetrična V zarezna strojno su izrađena na sredini ispitnog uzorka, a definirani su visinom i kutem od  $90^\circ$ . Ravnina smicanja se nalazi između V zarezna i okomita je na uzdužnu os uzorka. Stranice ispitnog uzorka moraju biti paralelne s postoljem i klinovima kako bi se izbjeglo izvan ravninsko savijanje i izvijanje.



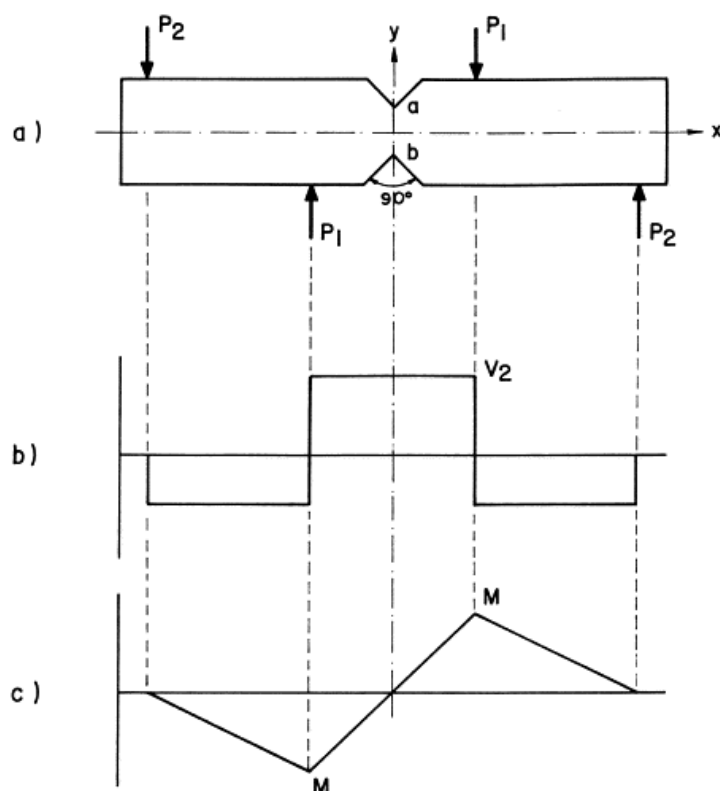
Slika 2.5. Iosipescu ispitni uređaj [7]

Prihvat je asimetričan i sastoji se od pomičnog i nepomičnog dijela (Slika 2.5). Pomični dio prihvata se pomiče pomoću linearnog ležaja postavljenog na osovini. Na svakoj polovici se nalazi pomični klin koji podešavanjem vijka pričvršćuje ispitni uzorak na prihvat.

Kako bi se osiguralo jednoliko smično opterećenje na ravnini smicanja (Slika 2.6.a)) ispitni uzorak se poravnava stavljanjem zatika u donji V zarez uzorka. Prihvat je konstruiran tako da se pomoću klinova te pomičnog i nepomičnog dijela prihвата postigne savijanje u četiri točke. Opterećenje  $P_1$  i  $P_2$  je postavljeno tako da je u ravnini smicanja moment savijanja jednak nuli (Slika 2.6.c)), odnosno kako bi se postiglo ujednačeno posmično naprezanje na sredini uzorka. Posmično naprezanje računa se preko izraza

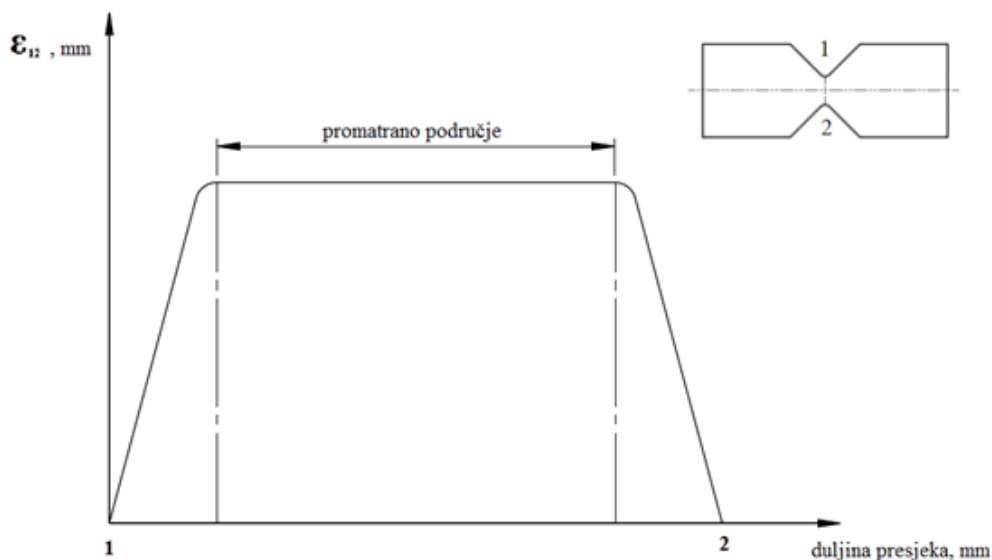
$$\tau_{xy} = \frac{P}{bt} \quad (7)$$

gdje je  $b$  visina, a  $t$  širina ispitnog uzorka.



**Slika 2.6. Iosipescu ispitni uzorak: a) prikaz opterećenja, b) dijagram poprečnih sila, c) momentni dijagram [8]**

Kod leptirastih uzoraka koje koriste Arcan prihvat i Iosipescu ispitni uređaj, V zarezima imaju veliki utjecaj na deformacije po duljini presjeka uzorka (Slika 2.7.). Od ruba zarezima prema uzdužnoj osi uzorka postoji naglo povećanje deformacija pa se taj dio zanemaruje, a proučava se samo središnji dio gdje su deformacije otprilike kontinuirane.

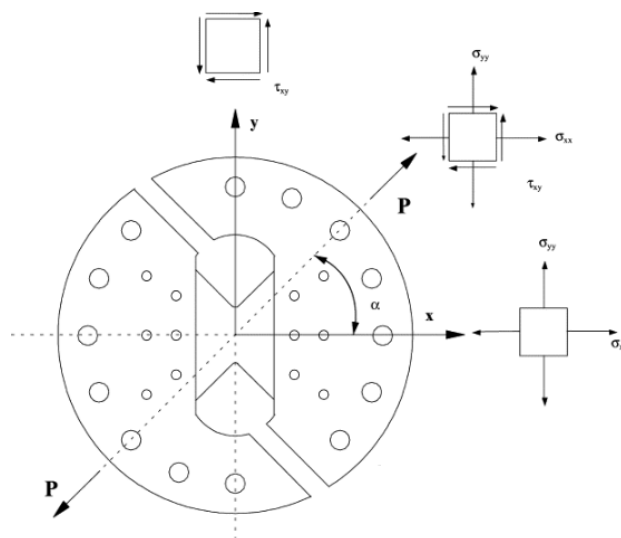


Slika 2.7. Dijagram deformacija po duljini presjeka

### 2.3. Arcan prihvat

Nekoliko godina nakon Iosipescu testa razvijen je Arcan prihvat za višeosno ravninsko ispitivanje materijala na jednoosnoj kidalici. Kada je prvi put izrađen 1978. koristio se za ispitivanje svojstava drveta. Uzorak se pričvršćivao na prihvat pomoću adheziva za što je bilo potrebno nekoliko sati. Kako bi se vrijeme postavljanja uzorka smanjilo, Liu et al. [9] su 1996. modificirali prihvat tako da se uzorak pričvrstio na prihvat pomoću vijaka. Ispitivanja su pokazala da je zbog vijaka došlo do izvijanja uzorka te pomicanja materijala u području oko vijaka. Zbog ovih problema do danas je izrađeno nekoliko modifikacija Arcan prihvata i ispitnih uzoraka.

Na Arcan prihvatu se također ispituju leptirasti uzorci (eng. *butterfly specimen*). Uniformno stanje smicanja se postiže kada su os V zarez (Slika 2.8.) i os po kojoj djeluje opterećenje (os kidalice) kolinearne. Zbog niza provrta na prihvatu moguće je narinuti tri opterećenja ovisno o kutu ugradnje prihvata  $\alpha$  (Slika 2.8.a)). Kada je  $\alpha = 0^\circ$ , tada je uzorak opterećen na vlak, a za  $\alpha = 90^\circ$  uzorak je opterećen na smik. Ukoliko je  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  tada se uzorak opterećuje na vlak i smik.



Slika 2.8. Mogućnosti opterećenja kod Arcan prihvata [10]

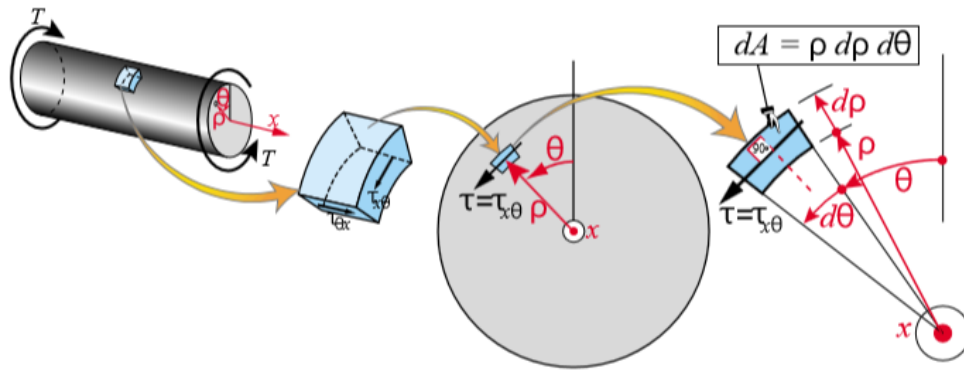
#### 2.4. Uvijanje štapova različitog poprečnog presjeka

Za ispitivanje smičnih deformacija također se koristi uvijanje tankostijenih cijevi te štapova. Ispitivanjem tankostijenih cijevi i štapova opterećenih momentom uvijanja dobiva se modul smicanja  $G$  i smična čvrstoća materijala  $\tau$ . Pri uvijanju štapova okruglog presjeka pretpostavlja se da

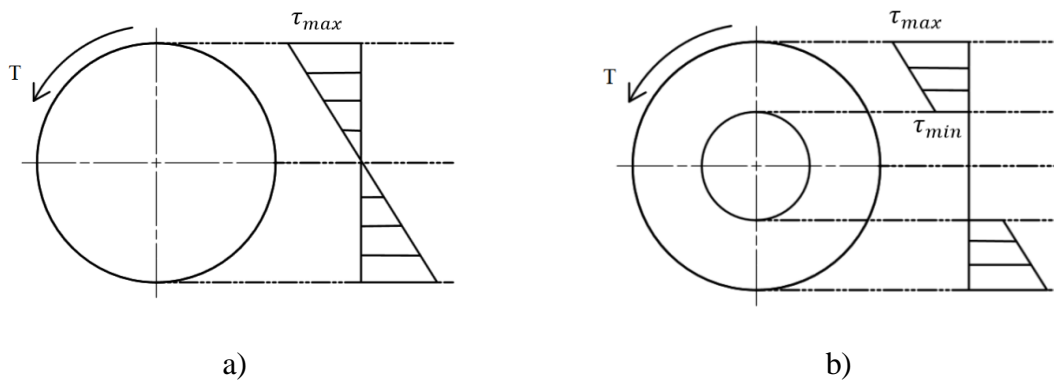
- pri deformiranju štapa poprečni presjeci ostaju ravni i okomiti na uzdužnu os štapa,
- poprečni presjeci zakreću se kao krute figure te
- normalno naprezanje  $\sigma_x$  jednako je nuli.

Na slici 2.9. prikazan je štap okruglog poprečnog presjeka koji je opterećen momentom torzije  $T$ . Na diferencijalnom elementu površine  $dA$  prikazana su posmična naprezanja za koja vrijedi  $\tau_{\theta x} = \tau_{x\theta} = \tau$ . Posmična naprezanja kod punih kružnih presjeka rastu linearno od nule u osi štapa do maksimalne vrijednosti  $\tau_{\max}$  na površini (Slika 2.10.a)). Posmično naprezanje kod štapa u obliku kružnog vijenca linearno raste od minimalne vrijednosti  $\tau_{\min}$  na unutarnjem promjeru štapa do maksimalne vrijednosti  $\tau_{\max}$  na površini (Slika 2.10.b)).





Slika 2.9. Uvijanje štapa okruglog presjeka i prikaz diferencijalnog elementa [11]



Slika 2.10. Raspored tangencijalnog naprezanja pri uvijanju štapa: a) kružnog poprečnog presjeka, b) poprečnog presjeka u obliku kružnog vijenca

Matrica tenzora naprezanja u cilindričnim koordinatama glasi

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_\rho & \tau_{\rho\theta} & \tau_{\rho x} \\ \tau_{\rho\theta} & \sigma_\theta & \tau_{\theta x} \\ \tau_{\rho x} & \tau_{\theta x} & \sigma_x \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Ako uzmemo u obzir da je  $\tau_{x\theta} = \tau_{\theta x} = \tau$ , matrica tenzora naprezanja kod uvijanja okruglog štapa glasi

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tau \\ 0 & \tau & 0 \end{bmatrix}. \tag{9}$$

Iz Hookevog zakona dobiven je izraz za kutnu deformaciju

$$\gamma = \frac{\tau}{G}, \tag{10}$$

gdje je  $G$  modul smicanja. Ako pogledamo diferencijalni moment sa slike 2.9. vidimo da na elementarnoj površini  $dA$  posmično naprezanje  $\tau$  radi elementarna sila  $dF = \tau dA$  i

elementarni moment  $dM = \rho dF = \rho \tau dA$ . Iz toga slijedi da elementarni moment  $M$  mora biti u ravnoteži sa unutarnjim torzijskim momentom  $T$  pa slijedi

$$T = \int_A \rho \tau dA = \int_A \frac{\rho}{R} \tau_{\max} \rho dA = \frac{\tau_{\max}}{R} \int_A \rho^2 dA = \frac{\tau_{\max}}{R} \int_A \rho^2 (\rho d\rho d\theta), \quad (11)$$

$$T = \frac{\tau_{\max}}{R} \int_A \rho^3 d\rho d\theta = \frac{\tau_{\max}}{R} I_p, \quad (12)$$

gdje je  $I$  polarni moment tromosti. Za puni kružni presjek on glasi

$$I_p = \frac{1}{2} R^4 \pi, \quad (13)$$

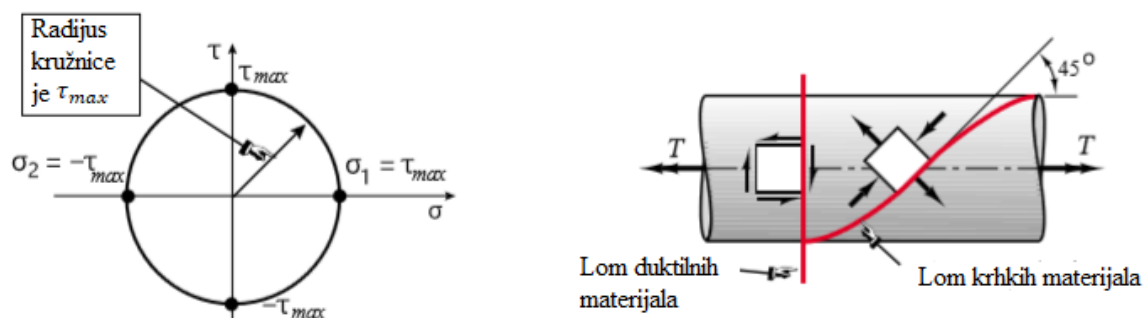
a za presjek u obliku kružnog vijenca moment tromosti glasi

$$I_p = \frac{1}{2} \pi (R_e^4 - R_i^4). \quad (14)$$

Iz jednadžbe (12) dobivamo da je posmično naprezanje na udaljenosti  $\rho$  od uzdužne osi jednako

$$\tau = \frac{T}{I} \rho. \quad (15)$$

Iz prethodne jednadžbe vidljivo je da je posmično naprezanje proporcionalno radijusu štapa. Radijus Mohrove kružnice (Slika 2.11.a) kod okruglih štapova opterećenih na uvijanje jednak je posmičnom naprezanju. Pri opterećenju štapa kružnog presjeka uvijanjem, način loma materijala ovisi o tome je li materijal krhak ili duktilan (Slika 2.11.b)). Ako je krhak (npr. lijevano željezo), do loma će doći kada dosegne maksimalnu vlačnu čvrstoću  $\sigma_1 = \tau_{\max}$ , a pukotina će nastati pod kutem od  $45^\circ$ . Kod duktilnih materijala (npr. meki čelik) lom nastaje na poprečnom presjeku nakon doseganja maksimalne smične čvrstoće  $\tau_{\max}$ .

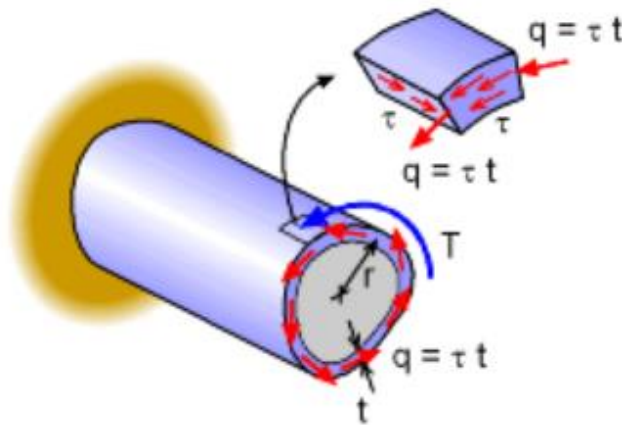


**Slika 2.11.** Štap okruglog presjeka opterećen na uvijanje: a) Mohrova kružnica, b) nastanak loma [11]

Pri ispitivanju smične čvrstoće materijala često se koriste tankostijene cijevi jer je posmično naprezanje kod uvijanja konstantno. Međutim, kod promjenjive debljine stijenke  $t$  (slika 2.12.) posmično naprezanje se mijenja prema slijedećem izrazu

$$\tau = \frac{q}{t} = \frac{hG\vartheta}{t}, \quad (16)$$

gdje je  $q$  tok posmičnih napreznja,  $h$  visina membrane,  $G$  modul smicanja, a  $\vartheta$  kut uvijanja.



Slika 2.12. Uvijanje tankostijene cijevi [12]

Kut uvijanja može se izračunati prema izrazu

$$\vartheta = \frac{T}{GI_t}, \quad (17)$$

a moment tromosti  $I_t$  za zatvorene presjeke glasi

$$I_t = \frac{4A_0^2}{\int \frac{ds}{t}}. \quad (18)$$

Tok posmičnih napreznja je konstantan po cijelom poprečnom presijeku i pomnožen sa duljinom kružnog luka  $ds$  daje silu  $dF$ . Za moment uvijanja  $T$  vrijedi

$$T = \int r dF = q \int r ds = q 2A_0, \quad (19)$$

gdje je  $A_0$  ploština koju zatvara središnja linija između vanjskog i unutarnjeg ruba poprečnog presjeka. Ako se uzme u obzir da je tok posmičnih sila jednak

$$q = \tau t \quad (20)$$

i uvrsti se u (19), dobije se izraz za posmično naprezanje

$$\tau = \frac{T}{2A_0t}. \quad (21)$$

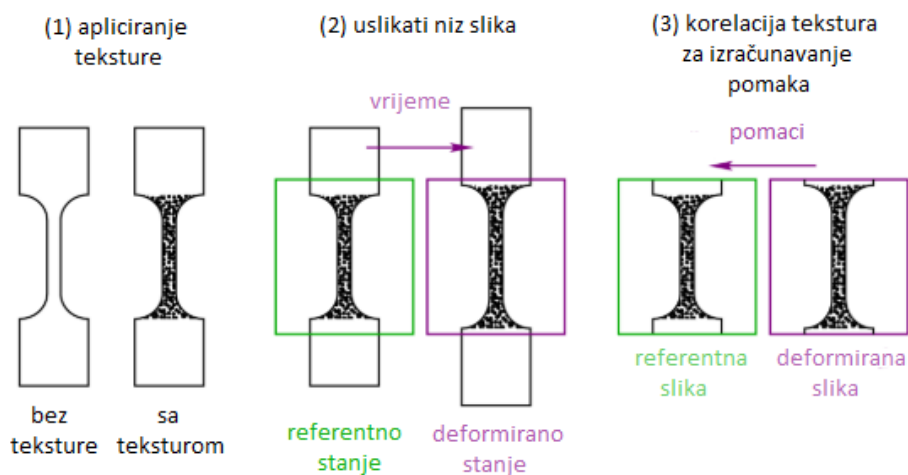
### 3. METODA KORELACIJE DIGITALNE SLIKE

Metoda korelacije digitalne slike (eng. *Digital Image Correlation*) je optička metoda mjerenja pomaka i/ili deformacija na površini krutih i deformabilnih tijela. Zbog jednostavne opreme, visoke preciznosti i beskontaktnog mjerenja ova metoda se unazad nekoliko godina sve više koristi. S obzirom na oblik uzorka koriste se različite metode. 2D metoda korelacije digitalne slike koristi jednu kameru i mjeri pomake samo na ravnim plohama. Stereo DIC koristi dvije ili više kamera i mjeri 3D pomake na ravnim i zakrivljenim plohama. Za mjerenje pomaka kroz volumen objekta koristi se korelacija digitalnog volumena (eng. *Digital Volume Correlation*) za što su potrebni složeni optički sistemi koji mogu vidjeti unutar materijala.

#### 3.1. Princip rada

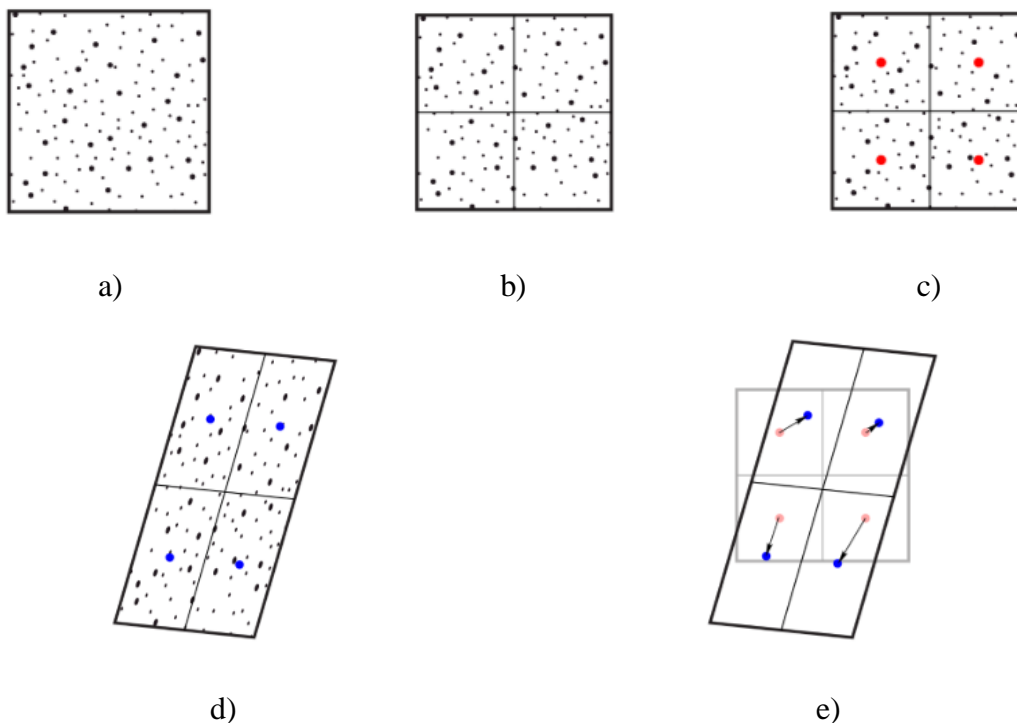
Osnovni zadatak metode korelacije digitalne slike je praćenje pomaka i deformacija na teksturi uzorka u slijedu slika. Vrlo je važno imati raznoliku teksturu na površini uzorka kako bi kontrast bio što veći da povezivanje slika i pomaka bude lakše. Najčešće se za to primjenjuje raster (sitne čestice boje ili praha) koji se nanosi stohastičkim raspršivanjem boje pod tlakom.

Proces se može podijeliti u tri koraka (Slika 3.1.). Prvi korak je nanijeti teksturu na nedeformirani uzorak što predstavlja referentno stanje. Nakon toga se uzorak opterećuje te se zabilježava niz slika do deformiranog stanja. Zadnji korak je korelacija između tekstuure zabilježene u početnoj konfiguraciji i tekstuure u deformiranoj konfiguraciji s ciljem određivanja pomaka.

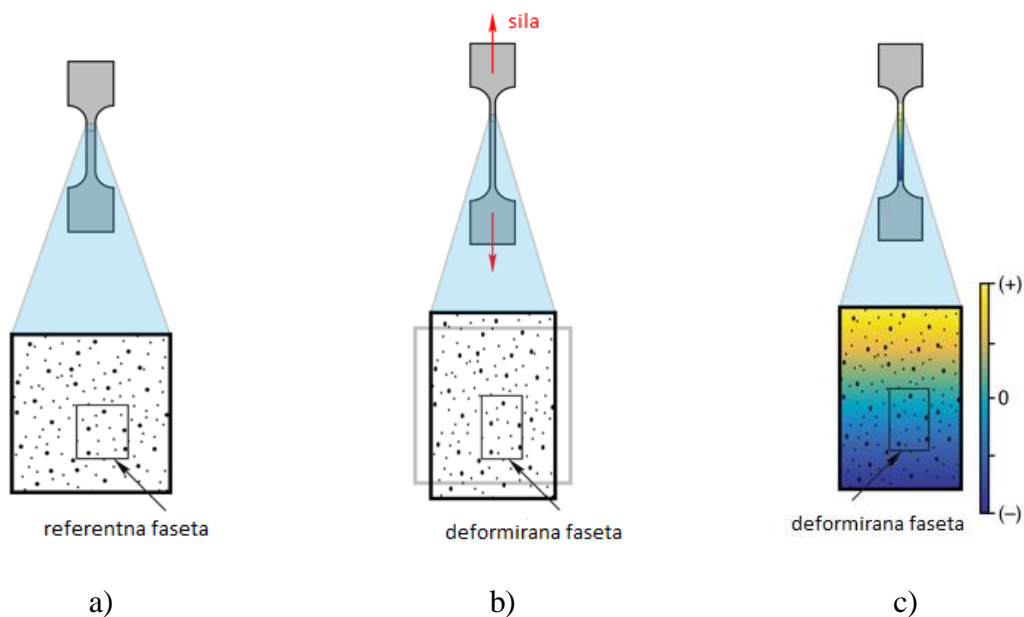


Slika 3.1. Prikaz procesa metode korelacije digitalne slike u tri koraka[13]

Na slici 3.2. prikazan je pojednostavljen prikaz analize korelacije digitalne slike. Na uzorku se prvo definira referentna tekstura koja se dijeli u fasete. Svaka faseta ima svoju točku središta. Nakon deformacije uzorka algoritam izračunava vektore pomaka između središta fasete od referentnog stanja do deformiranog stanja. Najjednostavniji primjer analize korelacije digitalne slike je na statičko vlačnom pokusu (Slika 3.3.). Za ovaj eksperiment je dovoljno koristiti 2D DIC kako bi se izmjerilo produljenje epruvete. Prije postavljanja na kidalicu prvo se na epruvetu nanosi tekstura. Nakon što se epruveta postavi na kidalicu, kamerom se zabilježava niz slika od početnog do deformiranog stanja epruvete. Na referentnoj slici se odabiru fasete te algoritam računa pomake njihovih središta do deformiranog stanja. Na taj način se dobivaju pomaci epruvete pri vlačnom naprezanju.

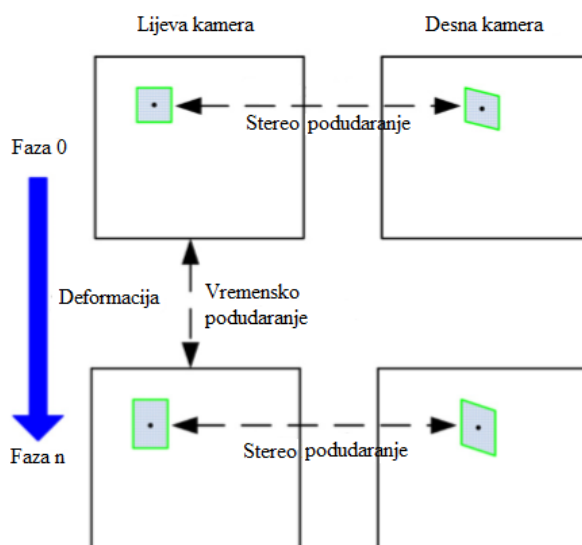


**Slika 3.2. Pojednostavljeni prikaz analize metode korelacije digitalne slike: a) definicija referentne teksture, b) fasete, c) središta fasete, d) deformirana referentna tekstura, e) izračun vektora pomaka [13]**



**Slika 3.3. Vlačni test: a) definicija referentne teksture, b) pronalazak deformirane fasete, c) korelacija pomaka [13]**

Za eksperimente gdje dolazi do izvijanja ili izvan ravninskih pomaka uzoraka potrebno je koristiti stereo DIC s dvije ili više kamera. U početnoj fazi se odabire referentna faseta te se izvrši stereo podudaranje slike između lijeve i desne kamere do deformiranog stanja (Slika 3.4.). Fotogrametrijskim postupcima može se dobiti 3D koordinata promatrane fasete. Uz stereo podudaranje, slike se i vremenski podudaraju od početne faze sve do krajnje faze  $n$  ili deformirane faze. Brzina snimanja (broj slika u sekundi) svojevremeno se odabire prije izvođenja eksperimenta.



**Slika 3.4. Procedura podudaranja slika kod stereo DIC-a[14]**

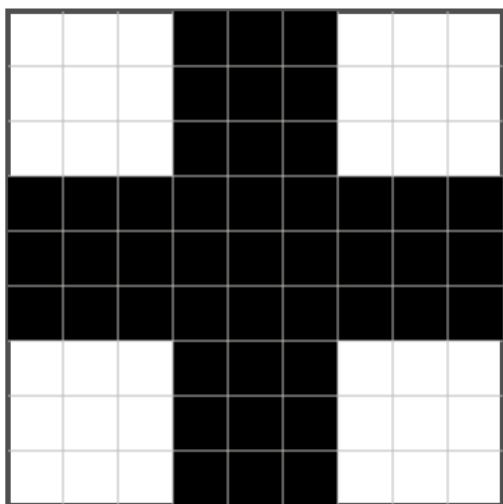
### 3.2. Kros-korelacijska funkcija

Kros-korelacijska funkcija služi za izračunavanje maksimuma u središnjoj točki odgovarajuće fasete. Sve nedeformirane fasete moraju biti iste veličine, a međusobno se razlikuju raspodjelom intenziteta sive boje (eng. *greyscale*). Svaki piksel ima svoju vrijednost na skali sive boje od 0 do 100. Na slikama 3.5.b) i d) u matričnom zapisu broj 0 predstavlja piksel crne boje, a broj 100 piksel bijele boje. Pomoću slika 3.5. i 3.6. prikazano je kako se mjere pomaci korištenjem kroskorelacijskog koeficijenta  $C$ . Referentna slika (slika 3.5.a)) veličine  $9 \times 9$  piksela prikazuje teksturu u obliku križa. Na deformiranoj slici i deformiranoj matrici (Slika 3.5.c) i d)) je vidljivo da se tekstura pomaknula za jedan piksel u smjeru osi  $x$  i  $y$ . Algoritam pomoću kros-korelacijske funkcije traži maksimumu nekoj točki na deformiranoj matrici i tako pronalazi gdje se faseta pomaknula tijekom deformacije. Kros-korelacijska funkcija glasi

$$C(x, y, u, v) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [f(x_i, y_j) \cdot g(x'_i, y'_j)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M f^2(x_i, y_j) \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M g^2(x'_i, y'_j)}}, \quad (22)$$

gdje je  $f(x_i, y_j)$  intenzitet u točki s koordinatama  $(x_i, y_j)$  na referentnoj faseti, a  $g(x'_i, y'_j)$  je intenzitet u točki s koordinatama  $(x'_i, y'_j)$  na deformiranoj faseti. Odabrana faseta je veličine  $5 \times 5$  piksela s korakom iznosa 1 piksel (Slika 3.6.). Središte joj je udaljeno 5 piksela od osi  $x$  i od osi  $y$ . Nakon deformacije pomak  $u$  u smjeru osi  $x$  te pomak  $v$  u smjeru osi  $y$  iznosi jedan piksel pa je maksimum kros-korelacijske funkcije u  $C(5,5,1,1)$ . Kros-korelacijska funkcija računa pomake po pikselima, a za subpikselsku funkciju je potrebna interpolacijska funkcija koja će najbolje opisati maksimum te funkcije.

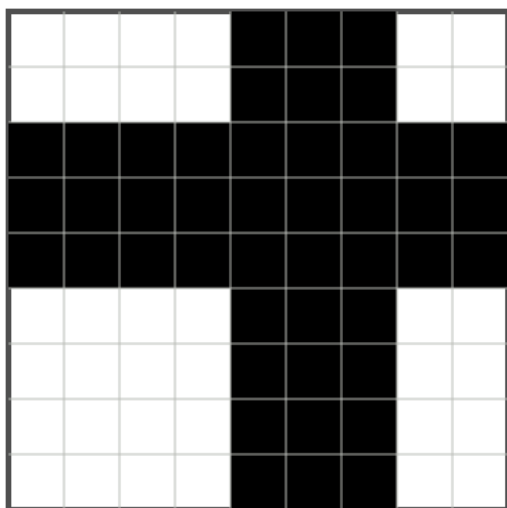




a)

|     |     |     |   |   |   |     |     |     |
|-----|-----|-----|---|---|---|-----|-----|-----|
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   | 0   |
| 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   | 0   |
| 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   | 0   |
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |

b)

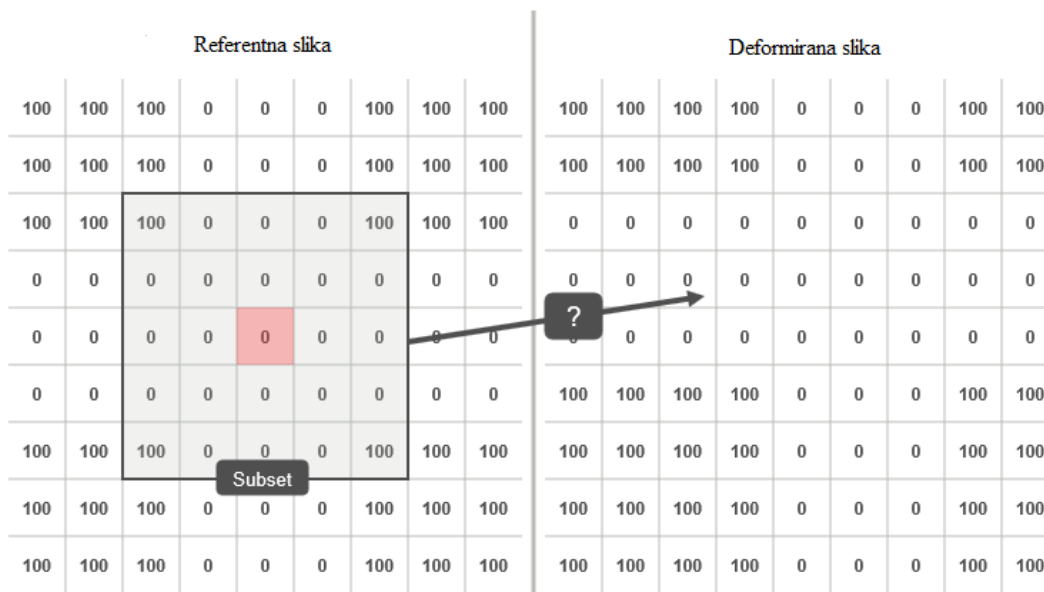


c)

|     |     |     |     |   |   |   |     |     |
|-----|-----|-----|-----|---|---|---|-----|-----|
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 0   | 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   |
| 0   | 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   |
| 0   | 0   | 0   | 0   | 0 | 0 | 0 | 0   | 0   |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |

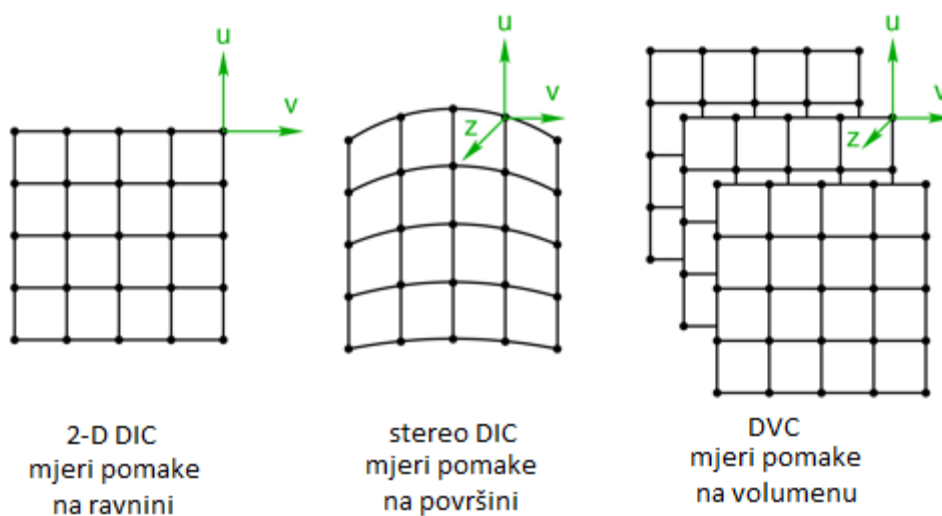
d)

Slika 3.5. Prikaz: a) referentne slike, b) matrice referentne slike, c) deformirane slike, d) matrice deformirane slike [15]



Slika 3.6. Prikaz fasete na referentnoj matrici uz deformiranu matricu [15]

### 3.3. Tipovi algoritama



Slika 3.7. Usporedba 2-D i stereo korelacije digitalne slike sa korelacijom digitalnog volumena [13]

Algoritmi digitalne korelacije slike se mogu podijeliti u dvije kategorije. Prva kategorija je podjela po dimenzijama pomaka. Tu pripadaju 2D i stereo korelacija digitalne slike te korelacija digitalnog volumena (DVC). 2D DIC koristi samo jednu kameru i može prepoznati pomake i deformacije samo na ravnim plohama, odnosno može prepoznati pomak  $u$  u smjeru osi  $x$  te  $v$  pomak u smjeru osi  $y$ . Zbog toga pri pomacima van  $xy$  ravnine može doći do velikih grešaka kod izračuna pomaka i deformacija. Stereo DIC može prepoznati pomake i

u smjeru osi  $z$  jer koristi više kamera. Ako se treća dimenzija pronalazi pomoću dvije kamere to se naziva stereo triangulacijom. No, bitno je naglasiti da stereo DIC može prepoznati pomake samo po površini uzorka, ne i po volumenu. DVC prepoznaje pomake po volumenu, ali za to su potrebni sistemi koji mogu vidjeti unutar materijala kao što su na primjer računalna tomografija (CT) te konfokalna laserska mikroskopija.

Druga kategorija je podjela po tehnici traženja teksture i dijeli se na lokalni i globalni DIC. Lokalni DIC dijeli teksturu na nekoliko faseta i svaku fasetu posebno traži na deformiranoj teksturi. Globalni DIC koristi metodu konačnih elemenata kako bi bez korištenja faseta pronašao pomake.

### 3.4. Priprema ispitnog uzorka

Da bi se mogla provesti korelacija digitalne slike, ispitni uzorak mora na sebi imati nasumično nanešenu teksturu. Neki materijali imaju prirodnu teksturu, ali u većini slučajeva potrebno je nanijeti umjetnu teksturu. Umjetna tekstura može se nanijeti špricanjem boje, nanošenjem tinte, čestica pudera, nanočestica ili litografiranjem.

Tekstura ima jednu od ključnih uloga u korelaciji digitalne slike. Bitno je da prekriva cijelo područje uzorka koje se promatra i da se pomiče i deformira zajedno s materijalom uzorka. Mrljice koje tvore teksturu moraju biti nasumično raspoređene po površini uzorka, ali je preporuka da budu približno jednake veličine. Najbolji rezultati postižu se ako su veličine od 3 do 7 piksela jer je tada tekstura zadovoljavajuće gustoće (Slika 3.8.). Poželjno je da 50% fasete bude ispunjeno teksturom.



Slika 3.8. Gustoća teksture [13]

### 3.5. Kamera, leće, osvjtljenje

Za visoko precizne rezultate potrebno je koristiti kvalitetne kamere. Najpoželjnije je korištenje crno bijelih kamera s niskom razinom šuma. Leće bi trebale imati što manju

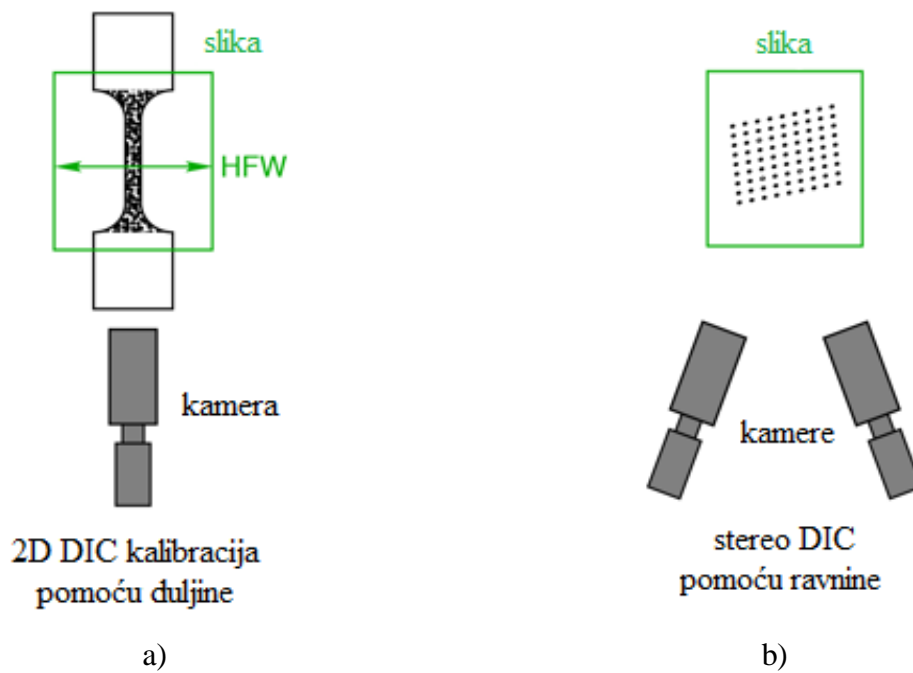
zakrivljenost, a poželjno je da se koriste telecentrične leće. Kamere se trebaju postaviti na kvalitetni tronožac kako bi se umanjile vibracije, a kablovi se trebaju povezati. Kamere se ne smiju pomicati jer i pomak od 50 nanometara može poremetiti rezultate. Bitno je što bolje fokusirati kamere kako bi rezultati bili što precizniji. Također, redovito čišćenje kamera i leća od velike je važnosti jer prašina može dosta utjecati na rezultate. Leće se moraju vrlo oprezno čistiti da se ne bi ogrebale.

Osvjetljenje treba biti jednoliko raspoređeno po površini uzorka. Treba biti oprezan s odabirom osvjetljenja jer prejako osvjetljenje može zagrijati uzorak što može uzrokovati pomicanje teksture. Na primjer, halogene lampe pružaju izvrsno osvjetljenje, ali se brzo zagrijavaju.

### **3.6. Kalibracija**

Kalibracija služi za podešavanje unutarnjih i vanjskih parametara kamera. 2D DIC (Slika 3.9.a)) koristi jednu kameru pa se kalibracija može provesti pomoću jedne poznate duljine, a ta duljina poznata je kao HFW (eng. *horizontal field width*) odnosno širina horizontalnog polja.

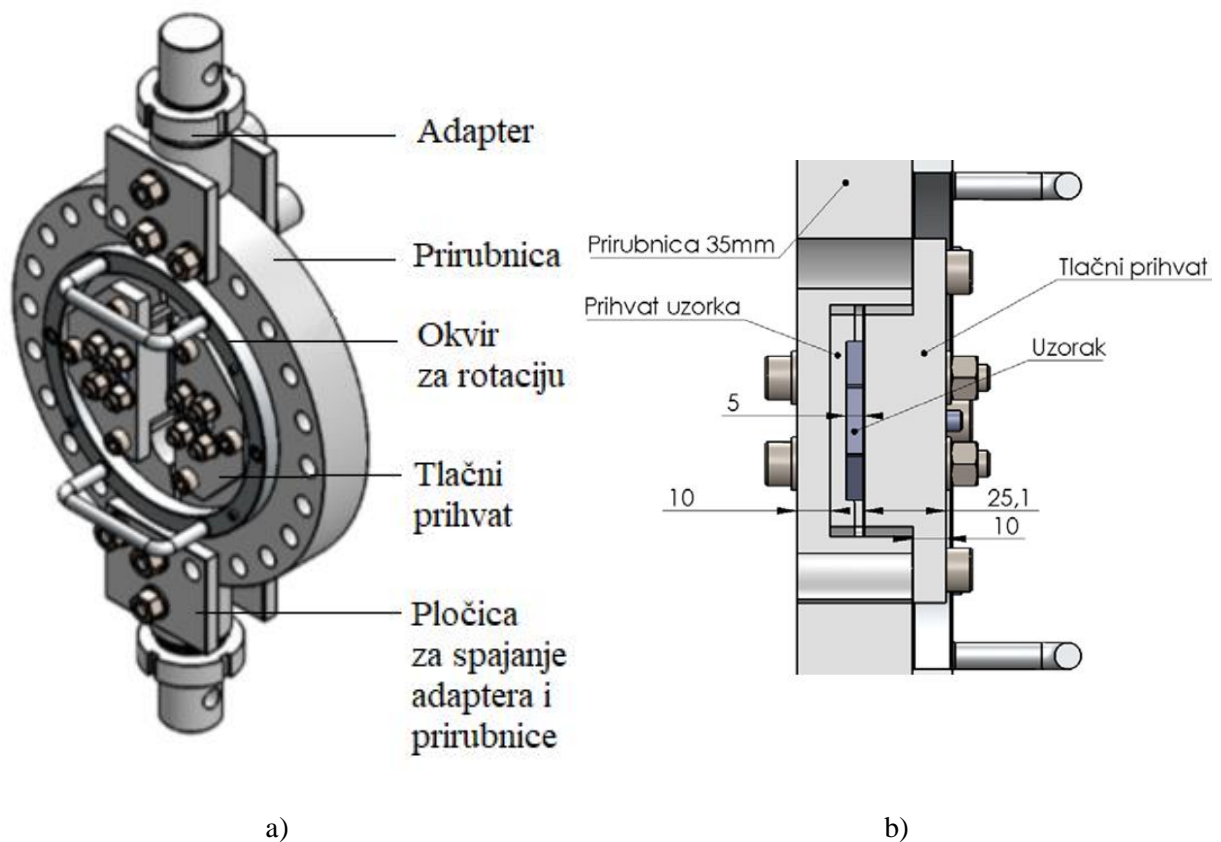
Za kalibraciju kamera kod stereo korelacije (Slika 3.9.b)) potrebno je uzeti u obzir razmak između dvije kamere te udaljenost senzora od kalibracijskog objekta. Sve veličine potrebne za ispravnu kalibraciju su predložene u priručniku softvera (npr. Aramis) za različite leće i veličine mjernih objekata. Koristi se ravni kalibracijski objekt, a potrebno je postići minimalno 15 pogleda na objekt kako bi kalibracija bila što preciznija. Greška kod ispravne kalibracije može iznositi 0,01 do 0,04 piksela. Potrebno je vrlo precizno kalibrirati kamere kako bi slika bila što oštija, a rezultati precizniji. Kamere se nakon kalibracije postavljaju pred mjerni uzorak, a po potrebi se namještaju izvori svjetla te se odabire brzina snimanja slika (broj slika u sekundi) i vrijeme ekspozicije.



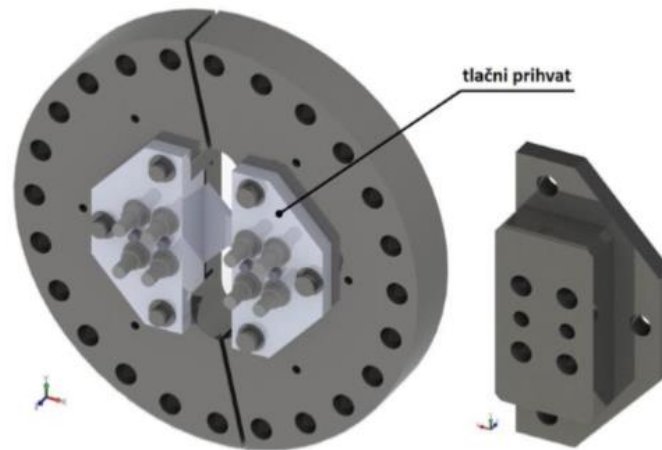
Slika 3.9. Prikaz: a) 2D kalibracije sustava, b) stereo DIC kalibracije sustava [13]

#### 4. NUMERIČKA ANALIZA

Numerička analiza Arcan prihvata [2] provedena je u programskom paketu *Abaqus* koji se temelji na metodi konačnih elemenata. Na slici 4.1.a) je prikazan prihvata sa svim dijelovima, a na slici 4.1.b) je prikazan presjek na kojem se vidi da se uzorak postavlja između prihvata uzorka i tlačnog prihvata. Prihvata uzorka je hrapave teksture da ne bi došlo do proklizavanja uzorka tijekom opterećenja. Za numeričku analizu korišten je pojednostavljeni Arcan prihvata (Slika 4.2.a)). Adapteri i okvir za rotaciju (slika 4.1.b)) nisu uzeti u obzir pri numeričkoj analizi jer nemaju utjecaj na pomake i deformacije.

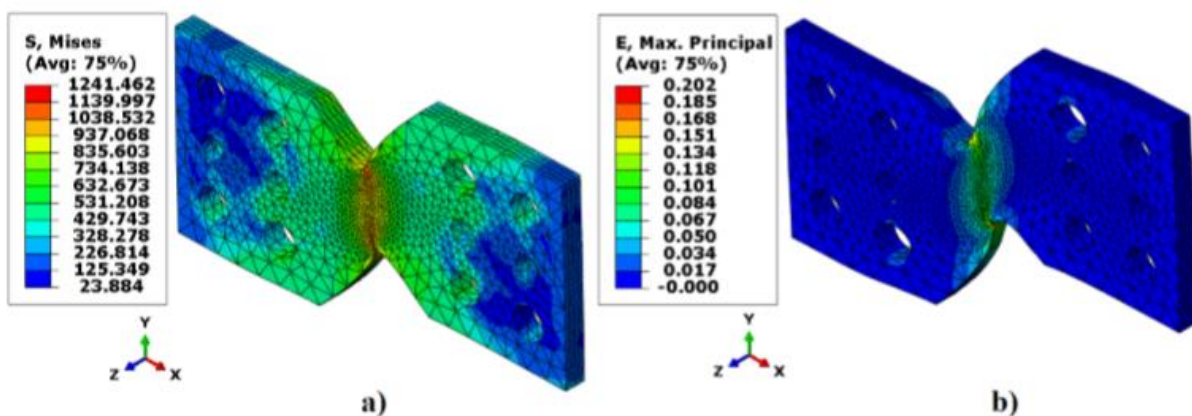


Slika 4.1. Arcan prihvata: a) dijelovi prihvata, b) presjek[2]



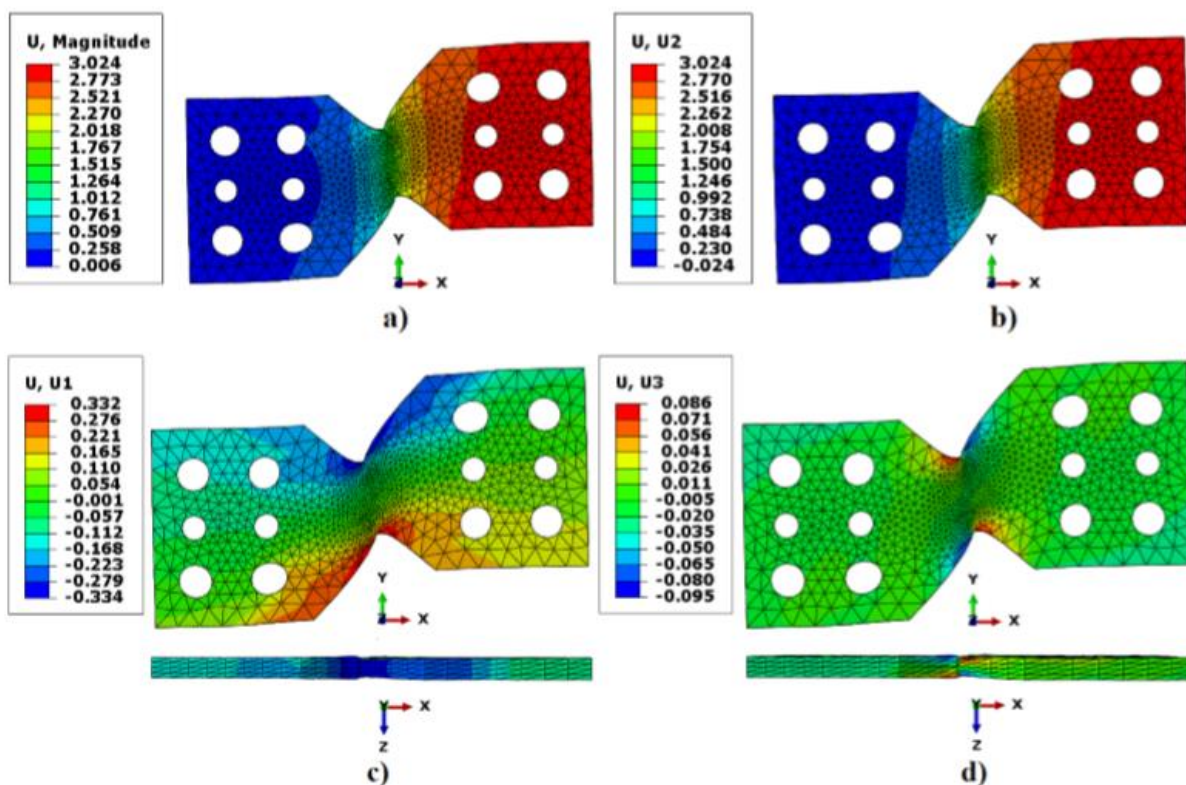
Slika 4.2. Proračunski model prihvata [2]

U numeričkoj analizi korišten je Youngov modul elastičnosti  $E=200$  GPa i Poissonov koeficijent  $\nu=0,3$  za sve komponente sklopa osim ispitnog uzorka te je uzet teoretski faktor trenja  $\mu=0,2$ . Za materijal ispitnog uzorka određen je nehrđajući čelik oznake 17-7 PH. U proračunskom modelu debljina ispitnog uzorka iznosi 5 mm jer je to najkonzervativniji slučaj. Uzorak debljine 5 mm je najkrući i potrebna je veća sila da bi se postigla određena deformacija uzorka. Za analizu korišteni su tetraedarski elementi drugog reda C3D10 zbog složene geometrije proračunskog modela.

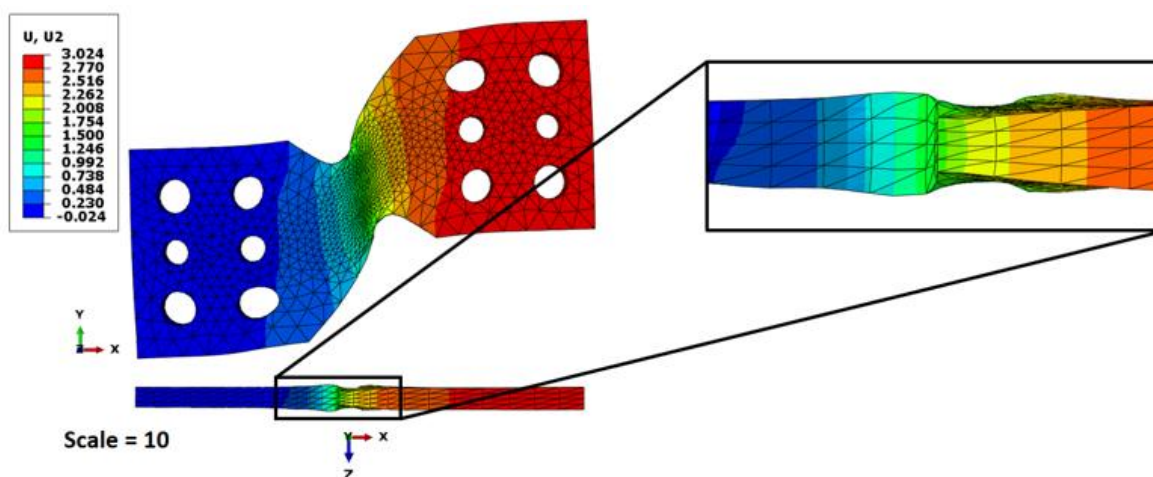


Slika 4.3. Prikaz a) naprezanja prema von Misesu, b) deformacija [2]





Slika 4.4. Prikaz a) ukupnih pomaka, b) pomaka u smjeru y osi, c) pomaka u smjeru x osi, d) pomaka u smjeru z osi [2]



Slika 4.5. Prikaz pomaka po osi y te gužvanja materijala [2]

Na slikama 4.2, 4.3 i 4.4 prikazana je analiza leptirastog uzorka. Svi rezultati prikazani su za deformaciju uzorka od 20%. Vidljivo je da su najveća naprezanja i deformacije u središtu ispitnog uzorka između korjena V zareza (Slika 4.2.). Najveće zabilježeno naprezanje po von Misesu iznosi 1241,46 MPa. Pomaci po svim osima su prikazani na slici 4.3. i vidi se da su najveći pomaci u smjeru osi y, odnosno u smjeru pomicanja desne prirubnice koja je spojena



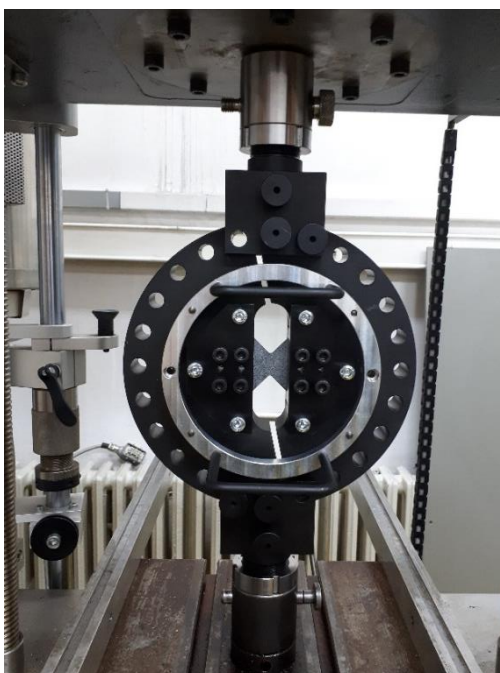
na kidalicu. Na slici 4.3.d) se vidi da su pomaci po osi  $z$  asimetrični. Crvena boja označava pomak u pozitivnom smjeru osi  $z$ , odnosno zadebljanje uzorka, a plava boja pomak u negativnom smjeru osi  $z$ , odnosno stanjenje uzorka. Zone zadebljanja i stanjenja su odvojene vrhom V zarez. Iznosi maksimalnog stanjenja i zadebljanja su približno jednaki po čemu se može zaključiti da su pomaci po osi  $z$  s obzirom na os  $x$  simetrični. Na tlocrtu ispitnog uzorka (slika 4.4.) može se uočiti fenomen gužvanja materijala koji se javlja kod smičnog opterećenja materijala.

## 5. PROVEDBA EKSPERIMENTA

Eksperiment je proveden na statičkoj kidalici Beta 50-5 (Messphysik Austrija) brzinom 0.5 mm/min. Korišten je optički mjerni sustav *Aramis 4M* sa dvije CCD kamere Dalsa Falcon 4M60 rezolucije 2350x1728 piksela i frekvencije 60 do 480 Hz. Ispitani su leptirasti uzorci debljine 1 mm, 2 mm i 4 mm.

### 5.1. Mehanički postav Arcan test metode

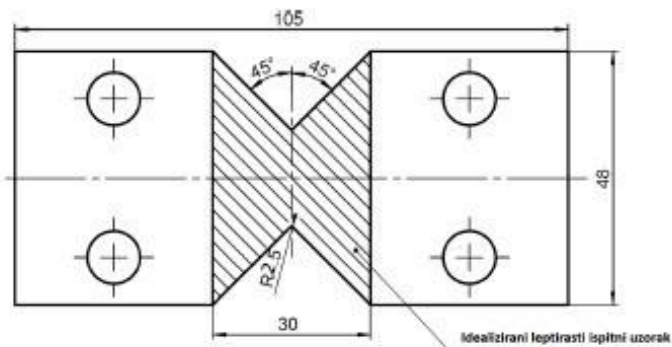
Arcan prihvata se sastoji od dvije simetrične prirubnice sa 12 provrta na svakoj prirubnici (slika 5.1.). Desna prirubnica se pomiče sa kidalicom, a lijeva miruje. Provrta služe za spajanje prirubnice s adapterom pomoću vijaka i pločice za vijke, odnosno omogućuju promjenu kuta ugradnje prihvata. Na taj način je moguće postići tri vrste opterećenja – vlačno, smično ili kombinaciju oba. Adapteri se postavljaju prvi na kidalicu, a vežu se na nju pomoću zatika. Okvir za rotaciju prihvata služi samo za montažu i postavljanje prihvata na kidalicu, a nakon toga se uklanja. Ovisno o tome koje je debljine uzorak, u prirubnice se stavljaju dva prihvata za uzorak odgovarajuće debljine te i sami ispitni uzorak. Nakon toga se postavljaju odgovarajući tlačni prihvat koji se pritežu na samu prirubnicu sa tri M8 vijka. Preostale četiri rupe su također za M8 vijke koji povezuju tlačni prihvata, uzorak, prihvata uzorka te prirubnicu.



Slika 5.1. Arcan prihvata postavljen za smično opterećenje

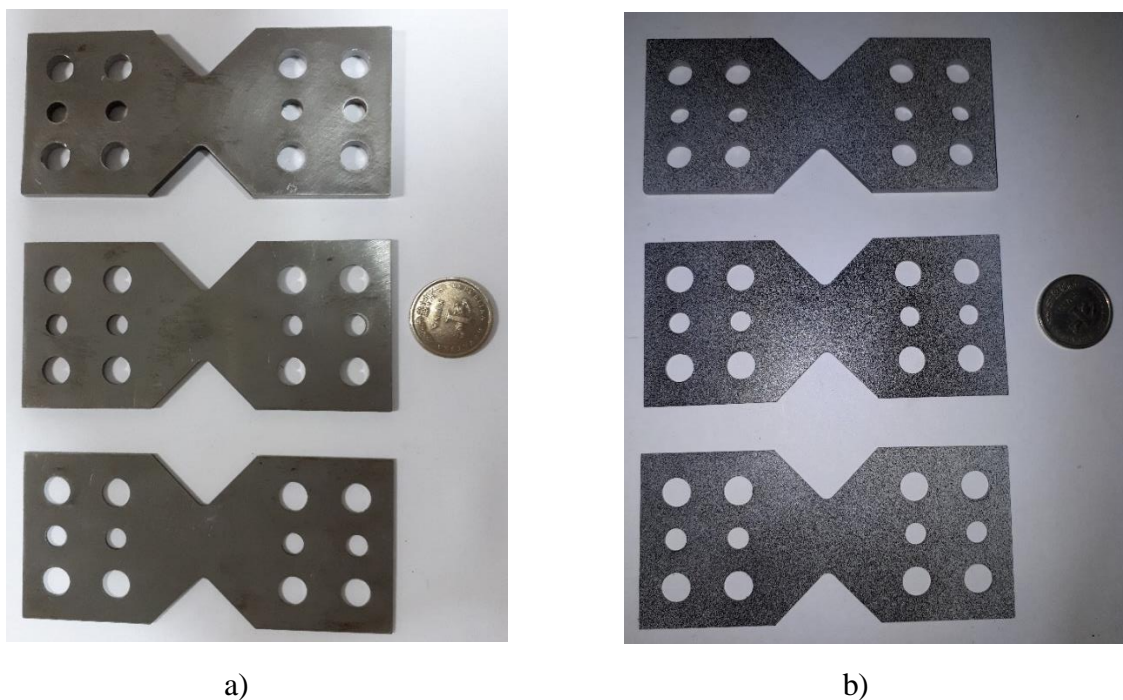
## 5.2. Ispitni uzorak

U ovom eksperimentu korišteni su ispitni uzorci izrađeni od čelika DC01 debljine 1, 2 i 4 mm. Uzorci su leptirastog oblika sa dva V zareza na sredini (slika 5.2.). Duljina ispitnog uzorka je 105 mm, a visina 48 mm. Promatrana zona je duljine 30 mm i visine 48 mm. Ispitni uzorak ima osam provrta za vijke M8 kojima se stežu tlačni prihvat, uzorak, prihvat uzorka te prirubnica. Preostale četiri rupe su za zaticke koji reduciraju smično opterećenje vijaka. U ovom ispitivanju zatici nisu bili korišteni.



Slika 5.2. Dimenzije ispitnog uzorka [16]

Da bi se uspješno provela korelacija digitalne slike, prije izvođenja eksperimenta na sve uzorke je nanešen raster crno bijele boje (Slika 5.3.b)). Prvo je nanešena bijela mat boja, a nakon toga točkice crne boje.



Slika 5.3. Ispitni uzorci: a) prije nanošenja rastera, b) nakon nanošenja rastera

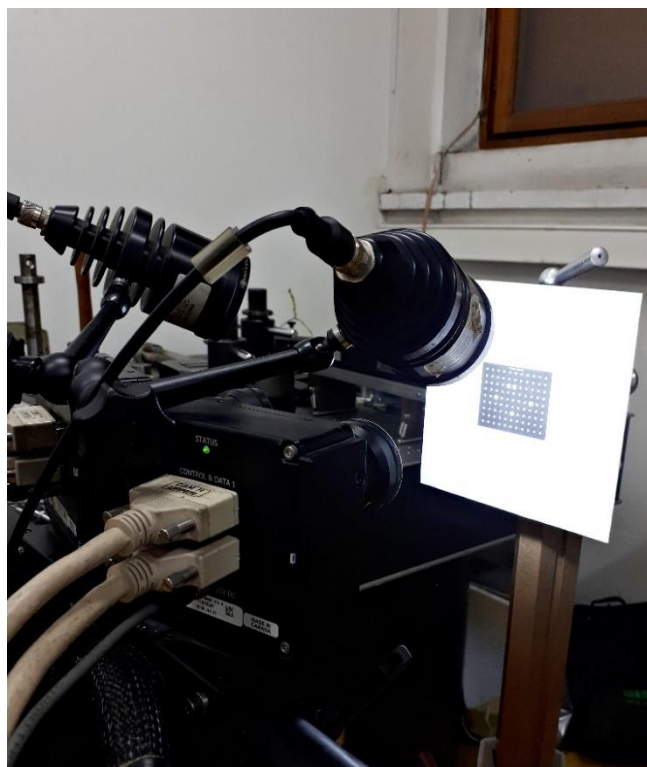
### 5.3. Optički postav

Za mjerenje pomaka i deformacija na uzorku korišten je beskontaktni optički sustav Aramis 4M. Korištene su dvije CCD kamere Dalsa Falcon 4M60 kako bi mogli zabilježiti fenomen gužvanja materijala pri vrhovima V zareza, tj. izmjeriti pomake po osi z. Digitalne slike su diskretizirane fasetama veličine  $30 \times 30$  piksela s korakom veličine  $15 \times 15$  piksela.

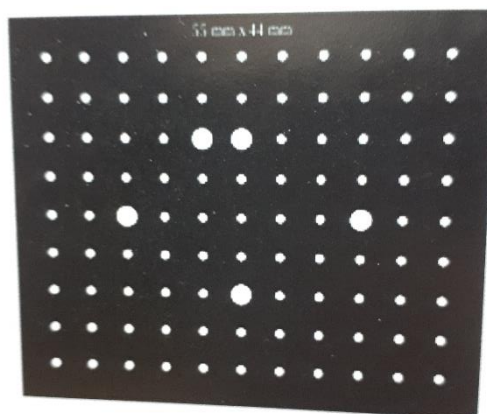
Prije početka ispitivanja bilo je potrebno kalibrirati sustav (Slika 5.4.a)). Za ispravnu kalibraciju koristeći leće od 50 mm i mjerni objekt veličine  $55 \times 44$  (Slika 5.4.b)) odabran je mjerni volumen  $65 \times 48$  mm za koji je trebalo podesiti parametre:

- Udaljenost između kamera na 108 mm,
- Udaljenost senzora od mjernog objekta na 305 mm,
- Kut između kamera na  $25^\circ$ .

Nakon što je provedena uspješna kalibracija, kamere su postavljene ispred uzorka postavljenog na prihvat (Slika 5.5.).



a)



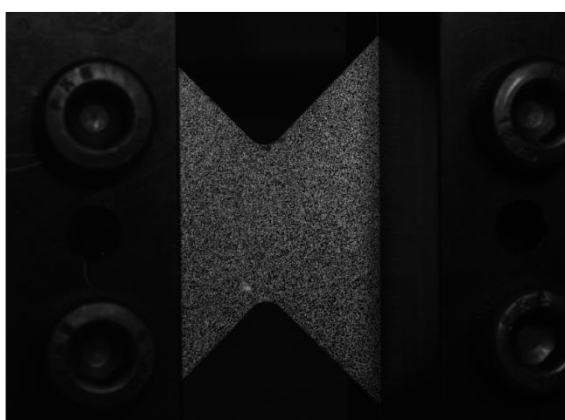
b)

Slika 5.4. Prikaz: a) kalibracije sustava, b) mjernog objekta veličine  $55 \times 44$  mm

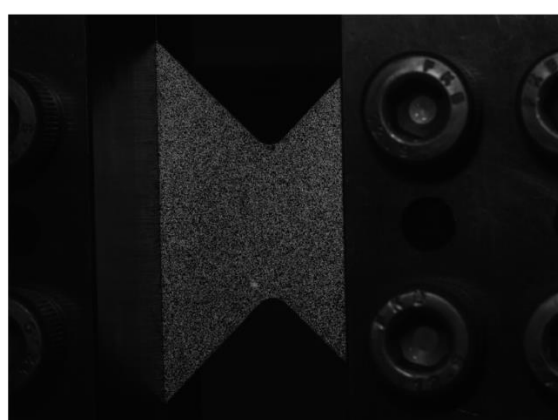


**Slika 5.5. Postavljanje optičkog sustava za ispitivanje**

Za usporedbu dobivenih rezultata za uzorke debljine 1, 2 i 4 mm korišteni su rezultati smičnog ispitivanja za uzorak od 3 mm. U tom ispitivanju korišten je veći mjerni objekt dimenzija 90×72 mm [16]. S manjim kalibracijskim objektom se dobije veća zona interesa s obzirom na rezoluciju slike (Slika 5.6.a) i b)). Korištenjem većeg kalibracijskog objekta zona interesa je manja (Slika 5.7. a) i b)).

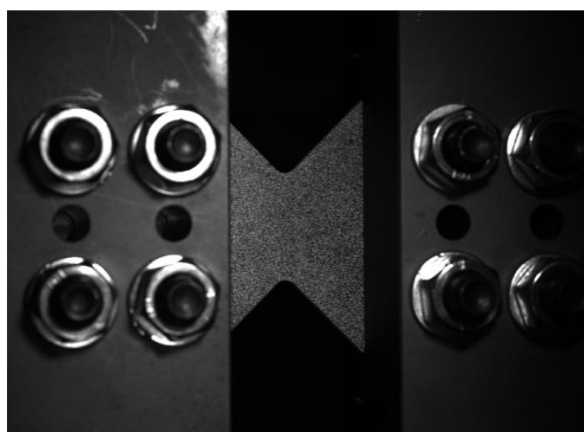


a) lijeva kamera

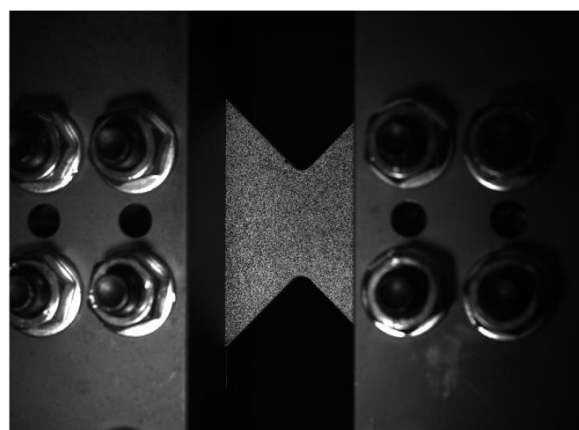


b) desna kamera

**Slika 5.6. Veličina mjerenog područja korištenjem mjernog objekta veličine 55x44 mm**



a) lijeva kamera



b) desna kamera

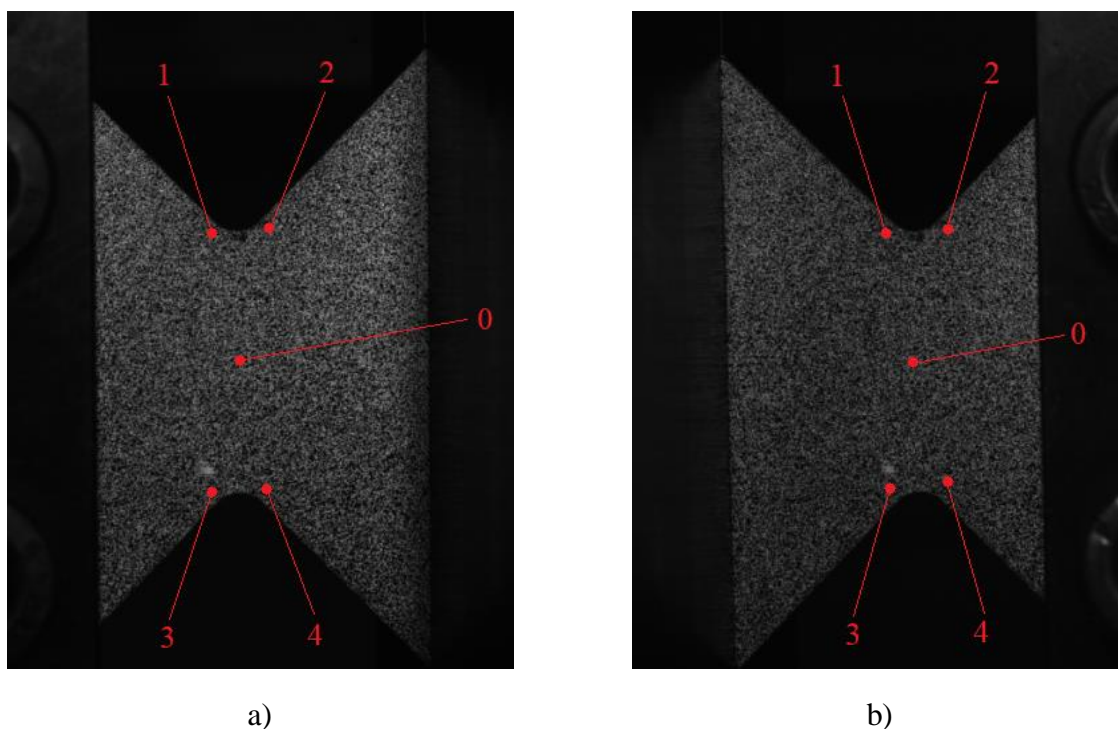
**Slika 5.7. Veličina mjerenog područja korištenjem mjernog objekta veličine 90x72 mm**



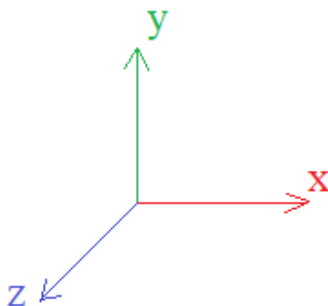
## 6. REZULTATI

Nakon provedbe eksperimenta izmjerena su polja pomaka i deformacija pomoću korelacijskog algoritma programskog paketa *Aramis* u zoni interesa na četiri različita ispitna uzorka. Također je analizirana ovisnost izvan ravninskih pomaka i deformacija leptirastog ispitnog uzorka s obzirom na debljinu epruvete i visinu ligamenata između dva V zareza.

U nastavku su prikazana polja smičnih deformacija  $\varepsilon_{xy}$  te polja pomaka po osi  $z$ . Budući da je uslijed smičnog opterećenja došlo do gužvanja materijala u blizini vrhova V zareza prikazano je smanjenje debljine uzorka (eng. *thickness reduction* – TR). Kod kvantifikacije zone zadebljanja postavljene su točke od 1 do 4 (Slika 6.1.) na nedeformiranim uzorcima u područjima gdje je došlo do najvećih promjena u debljini. Vrijednosti smičnih deformacija  $\varepsilon_{xy}$  analizirane su u točki 0 koja se nalazi u središtu promatrane zone ispitnog uzorka. Rezultati mjerenja za odabrane točke sažeti su i prikazani u tablicama za sve ispitane ispitne uzorke. Odgovarajući koordinatni sustav prikazan na slici 6.2. za je jednak za sve ispitne uzorke.



**Slika 6.1. Prikaz odabranih točaka na nedeformiranom uzorku za analizu rezultata: a) lijeva kamera, b) desna kamera**



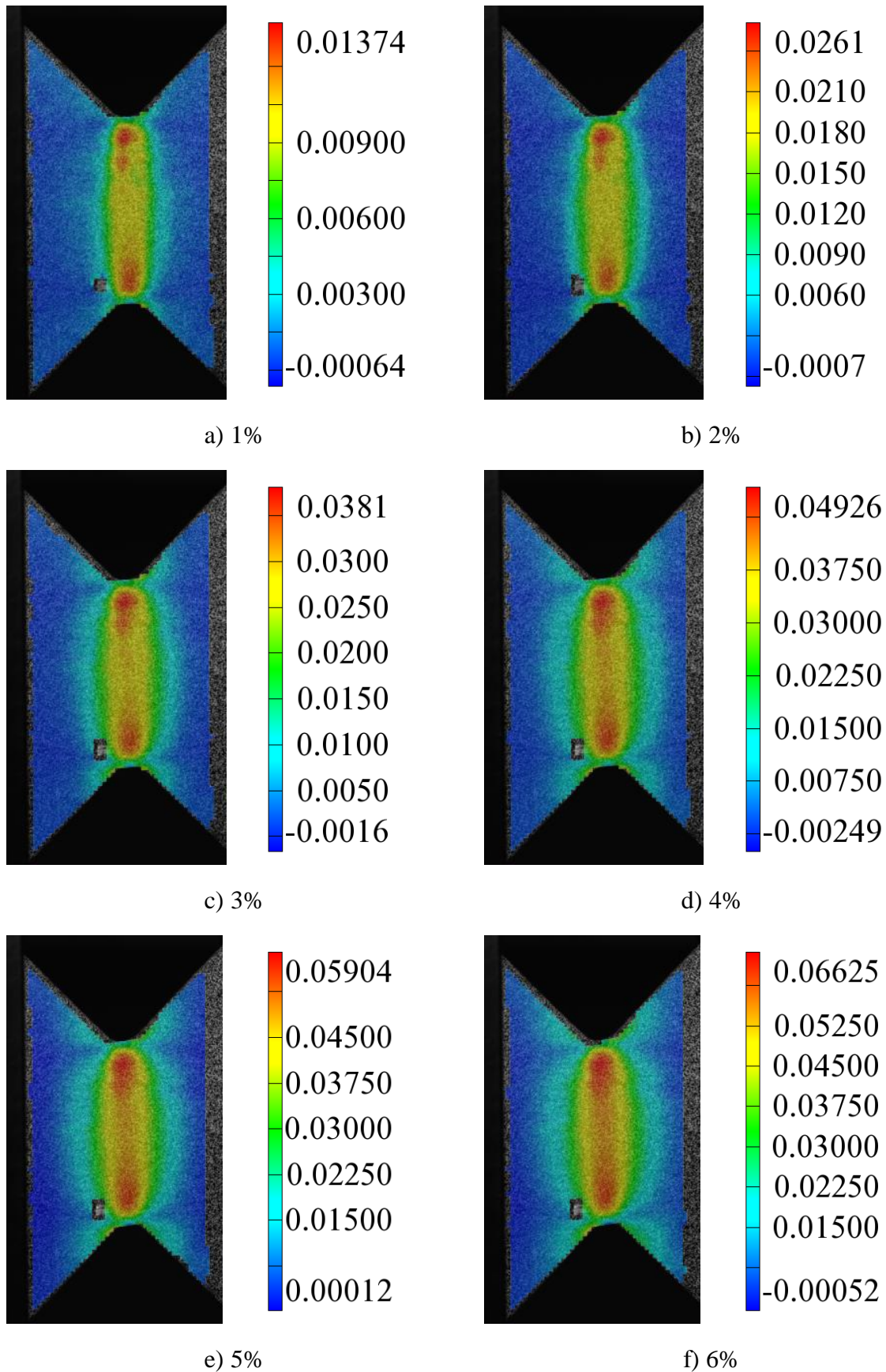
Slika 6.2. Koordinatni sustav

### 6.1. Analiza rezultata mjerenja cijelog polja pomaka za uzorak debljine 1 mm

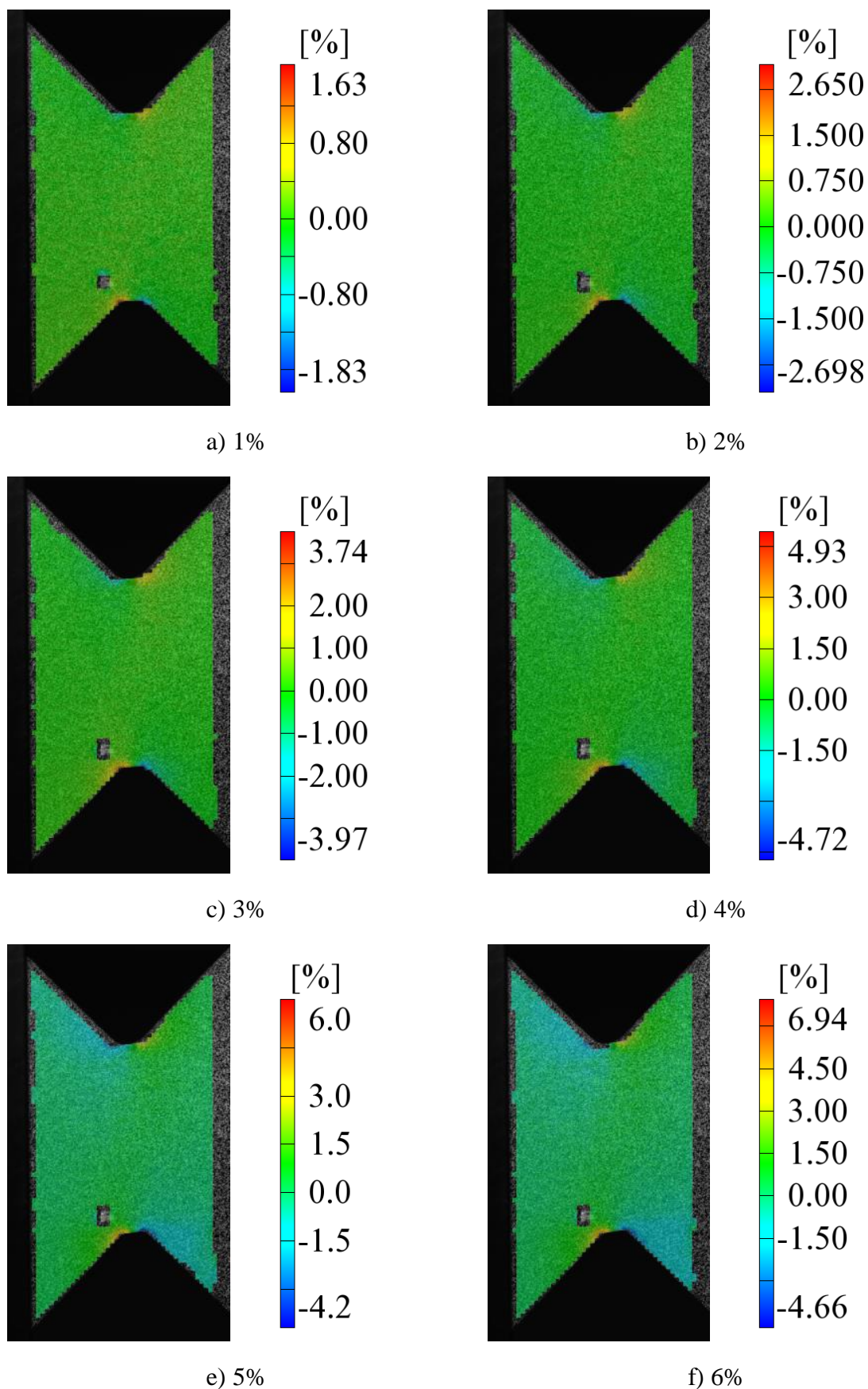
Pri smičnom opterećenju leptirastog uzorka debljine 1 mm najveće smične deformacije se nalaze na vertikalnoj osi između dva V zareza (slika 6.3.). Uslijed opterećenja formirana je smična deformacijska traka (eng. *shear band*). Maksimalne smične deformacije se nalaze u vrhu V zareza, dok su u središnjoj zoni deformacije homogeno distribuirane. Stoga se u obzir uzima središnji vertikalni pojas u kojem su ujednačene vrijednosti smičnih deformacija. Uslijed povećanja narinutog opterećenja smična deformacijska traka postaje uniformna, tj. razlika između maksimalne smične deformacije u vrhu V zareza i deformacije u središtu uzorka postaje sve manja. Također, s povećanjem opterećenja polje deformacija oko smične deformacijske trake se simetrično širi s obzirom na vertikalnu os simetrije ispitnog uzorka. Može se primijetiti da je od početka opterećenja maksimalna smična deformacija približno jednaka ekvivalentnoj deformaciji uzorka.

Na slici 6.4. prikazano je smanjenje zadebljanja ispitnog uzorka koje se javlja uz korijen V zareza. Pozitivne vrijednosti predstavljaju stanjenje, a negativne vrijednosti zadebljanje uzorka. Može se primijetiti da je stanjenje i zadebljanje uzorka asimetrično s obzirom na vertikalnu os simetrije te da se njihova područja šire s povećanjem deformacije uzorka. Vrijednosti stanjenja i zadebljanja su približno jednake do 4% deformacije ispitnog uzorka (Slika 6.3.d)). Od 5% deformacije ispitnog uzorka (Slika 6.3.e)) stanjenje počinje rasti brže dok zadebljanje ostaje približno konstantno.



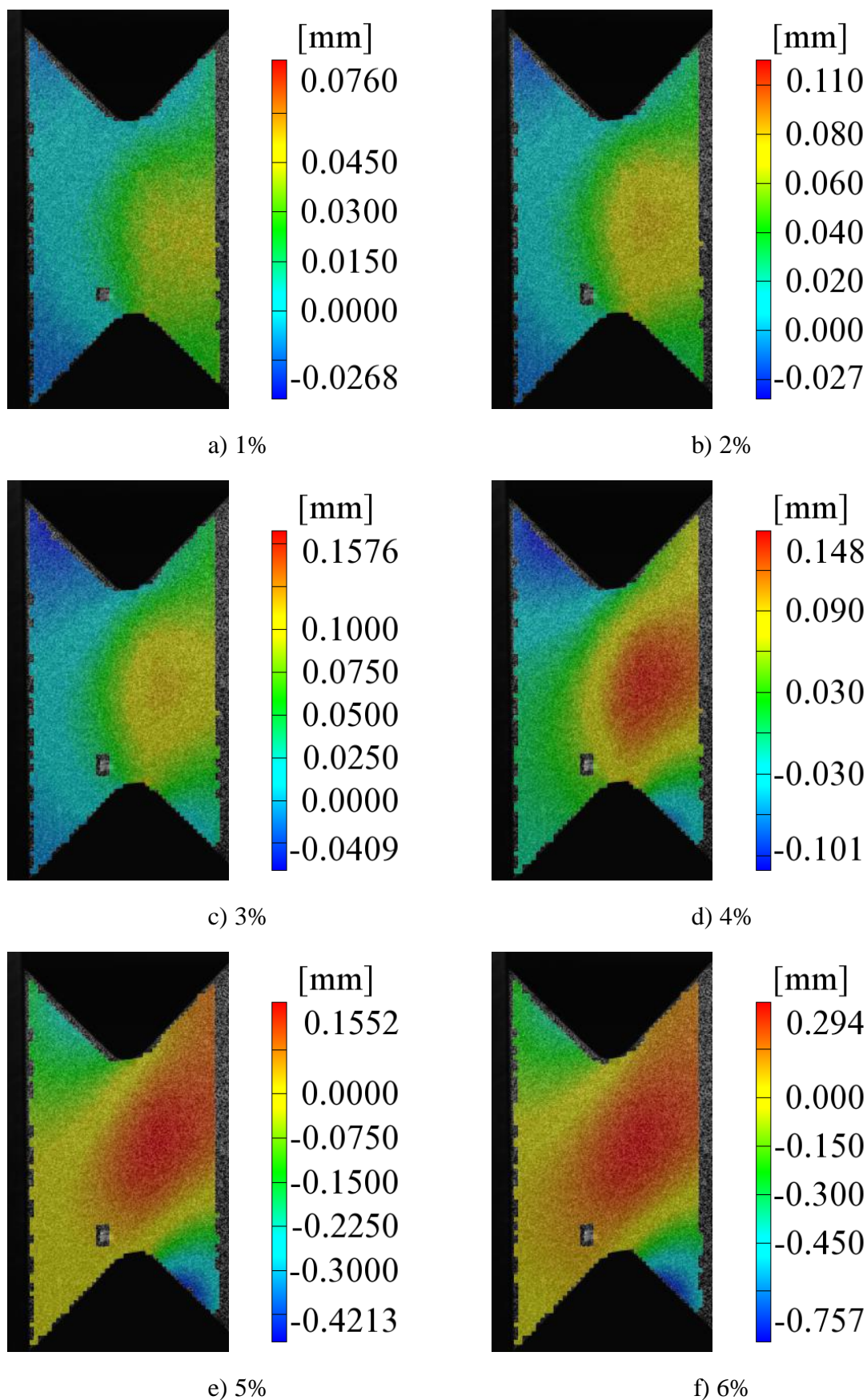


**Slika 6.3. Polje smičnih deformacija  $\varepsilon_{xy}$  kod uzorka debljine 1 mm. Deformacija je izražena kao bezdimenzijska veličina. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od:**



**Slika 6.4. Promjena smanjenja debljine uzorka s obzirom na povećanje narintog opterećenja kod ispitnog uzorka debljine 1 mm. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od:**

Kod smičnog opterećenja uzorka debljine 1 mm dolazi do izvijanja (tj. nestabilnosti). Analizom pomaka u smjeru osi  $z$  (slika 6.5.) izmjereno je nehomogeno polje pomaka. Pri deformaciji od 1% (Slika 6.5a)) na desnoj strani uzorka stvara se polukružna zona u kojoj se javljaju pozitivni pomaci u smjeru osi  $z$ . Povećanjem opterećenja ta se zona širi dijagonalno od desnog gornjeg kuta uzorka prema lijevom donjem kutu. Kod 6% deformacije (Slika 6.5.f)) izražena je dijagonalna zona pomaka u pozitivnom smjeru osi  $z$ , dok su u desnom gornjem i lijevom donjem dijelu uzorka izmjereni negativni pomaci u smjeru osi  $z$ . Razlika između pozitivnog i negativnog pomaka po osi  $z$  pri 5% smičnih deformacija iznosi 0,5765 mm dok kod 6% deformacija iznosi 1,051 mm. Iz toga je vidljivo da je izvijanje uzorka izraženije s povećanjem narinutog smičnog opterećenja. Analizom rezultata pomaka po os  $z$  može se zaključiti da je uslijed nestabilnosti formiran dijagonalni žlijeb s obzirom na početnu ravninu leptirastog ispitnog uzorka debljine 1 mm. Zbog nastalog izvijanja ispitnog uzorka debljine 1 mm u obzir su uzeti rezultati do 6% posmičnih deformacija izmjerenih u točki 0.



**Slika 6.5. Promjena polja pomaka u smjeru osi z s obzirom na povećanje narinutog opterećenja kod uzorka debljine 1 mm. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od:**



U tablici 6.1. prezentirane su vrijednosti karakterističnih izmjerenih veličina (tj. narinute sile, naprezanja te smanjenja debljine) za posmične deformacije leptirastog uzorka od 1% do 6%. Ekvivalentna deformacija od 1% postignuta je kod sile 2,166 kN. Maksimalno naprezanje ostvareno je kod sile od 3,089 kN a iznosi 52,017 MPa. Smanjenje debljine uzorka u točkama 1 i 4 je negativno što znači da je došlo do zadebljanja ispitnog uzorka. Vrijednosti zadebljanja u navedenim točkama približno su jednake do 3% smičnih deformacija. Povećanjem opterećenja može se uočiti da zadebljanje u točki 4 brže raste zbog većeg doprinosa izvijanja uzorka. U točkama 2 i 3 zabilježeno je stanjenje ispitnog uzorka. Vrijednosti stanjenja se jako dobro poklapaju kod obje točke za dio eksperimentalnog istraživanja do izrazite pojave nestabilnosti ispitnog uzorka. Na slici 6.6. prikazan je deformirani uzorak. Pukotine su nastale na mjestima gdje se pojavljuje maksimalni fenomen stanjenja ispitnog uzorka (tj. u području točaka 2 i 3).

**Tablica 6.1. Vrijednosti karakterističnih izmjerenih veličina kod smičnog mehaničkog ispitivanja za ispitni uzorak debljine 1 mm**

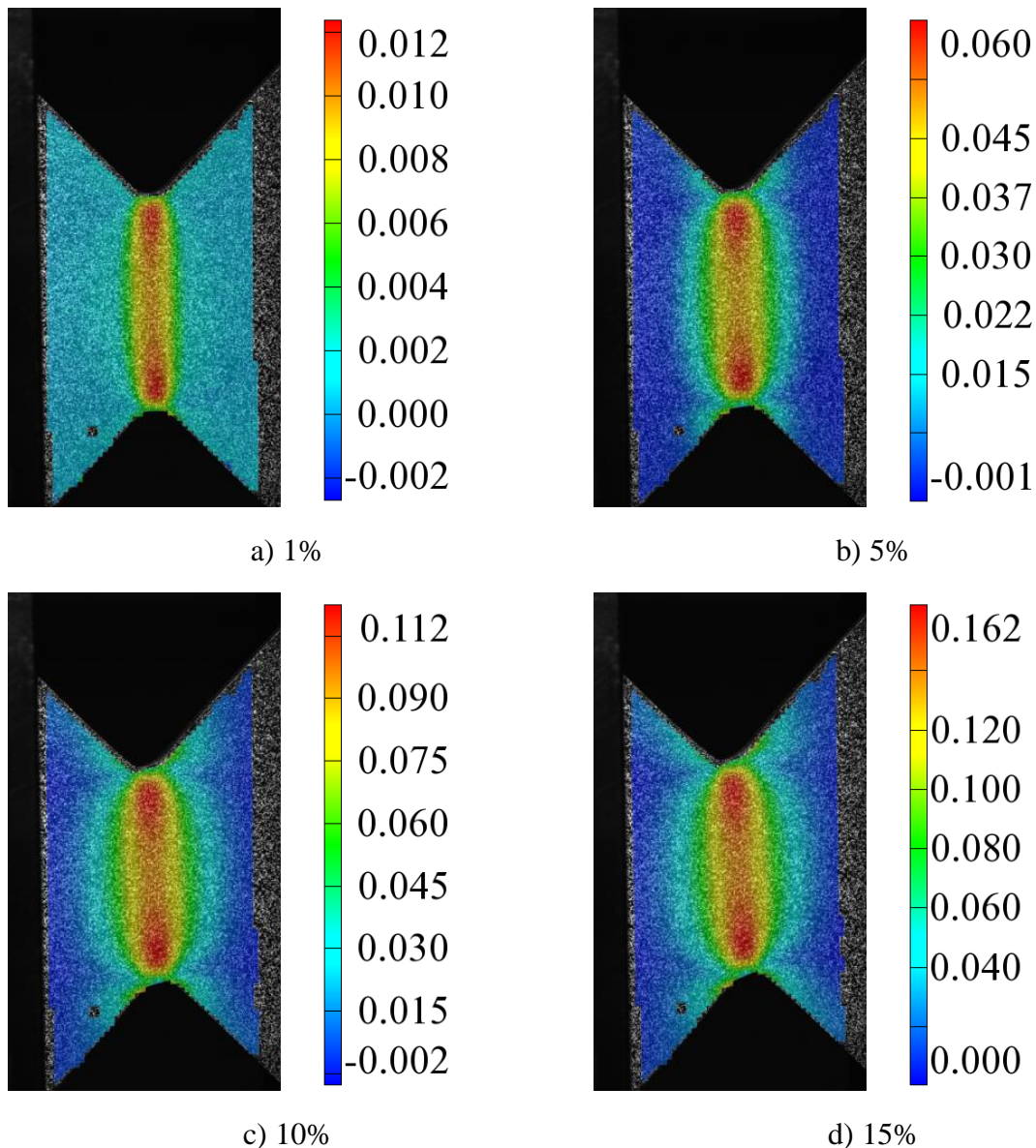
| Br. slike | $\varepsilon$ [%] | $\varepsilon_{xy}$ [%] | Sila [kN] | Naprezanje [Mpa] | $TR_1$ [%] | $TR_2$ [%] | $TR_3$ [%] | $TR_4$ [%] |
|-----------|-------------------|------------------------|-----------|------------------|------------|------------|------------|------------|
| 43        | 1                 | 0,991757               | 2,166     | 36,479           | -0,217     | 0,435      | 0,47       | -0,251     |
| 63        | 1,98              | 1,934711               | 2,419     | 40,724           | -0,457     | 0,821      | 0,88       | -0,674     |
| 88        | 3,006             | 2,921413               | 2,647     | 44,570           | -0,743     | 1,121      | 1,327      | -1,061     |
| 116       | 4,012             | 3,888947               | 2,844     | 47,887           | -1,073     | 1,534      | 1,795      | -1,307     |
| 145       | 4,991             | 4,789397               | 2,996     | 50,444           | -1,466     | 1,868      | 2,298      | -1,356     |
| 170       | 5,899             | 5,532147               | 3,089     | 52,017           | -1,651     | 2,256      | 2,81       | -1,166     |

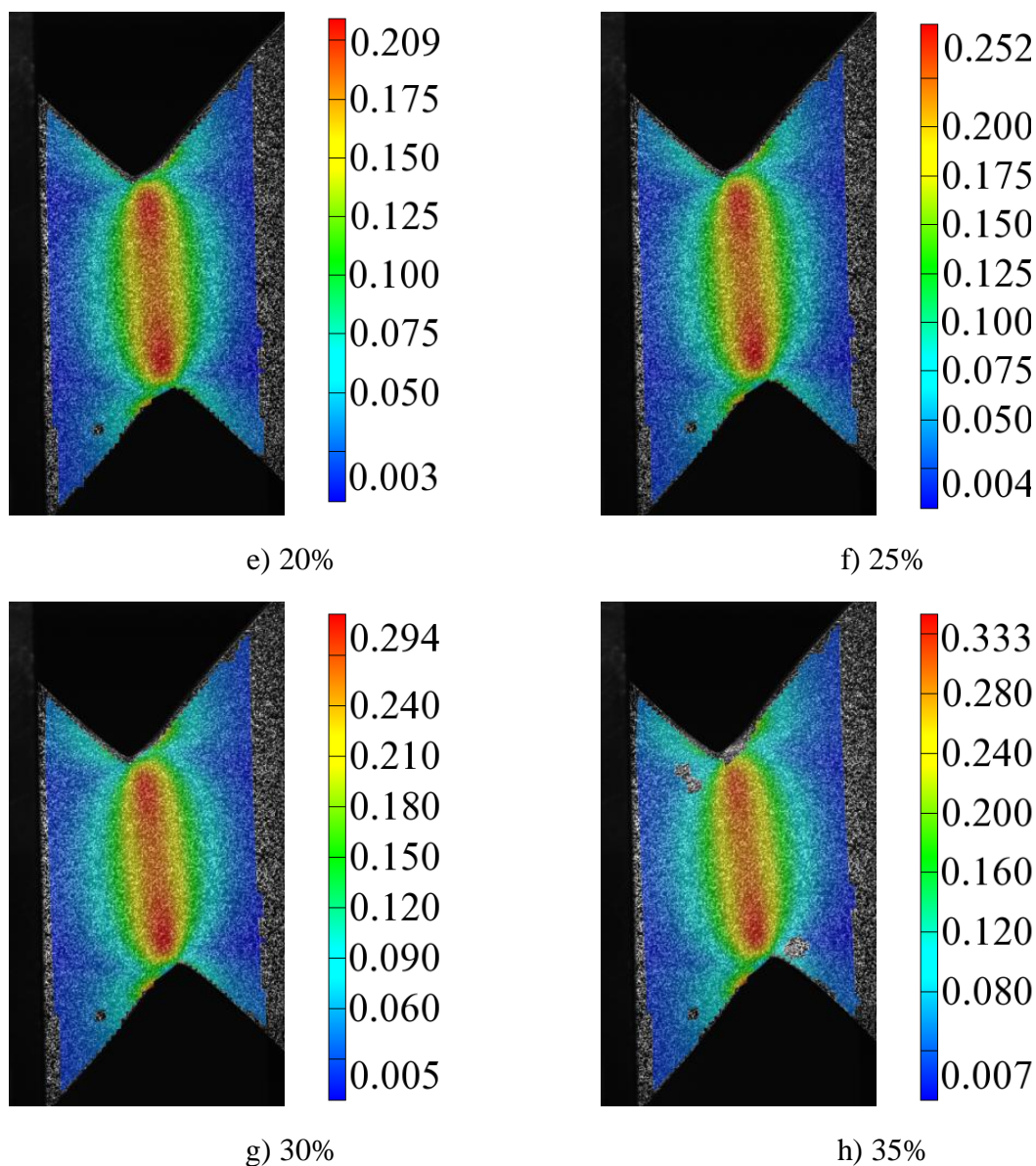


**Slika 6.6. Deformirani ispitni uzorak debljine 1 mm**

## 6.2. Analiza rezultata mjerenja cijelog polja pomaka za uzorak debljine 2 mm

Na leptirastom uzorku debljine 2 mm (Slika 6.7.) se također može primijetiti smična deformacijska traka između V zareza. Pri deformaciji uzorka od 1% (Slika 6.7.a)), maksimalne deformacije se nalaze pri vrhovima dva V zareza. Povećanjem opterećenja smična deformacijska traka postaje homogenija (tj. vrijednosti smičnih deformacija u blizini V zareza i središtu promatrane zone interesa su približno jednaki). Usporedbom slike 6.7.a) i 6.7.h) može se primijetiti širenje zone deformiranja uz smičnu deformacijsku traku.

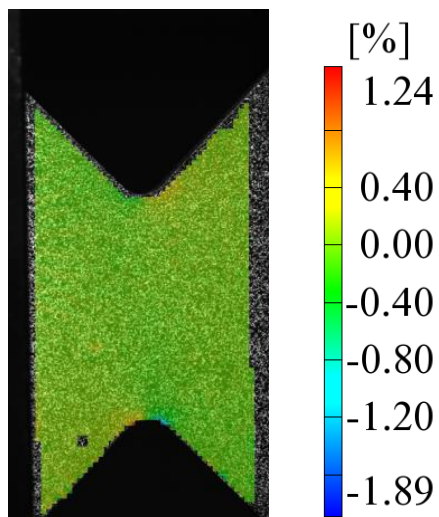




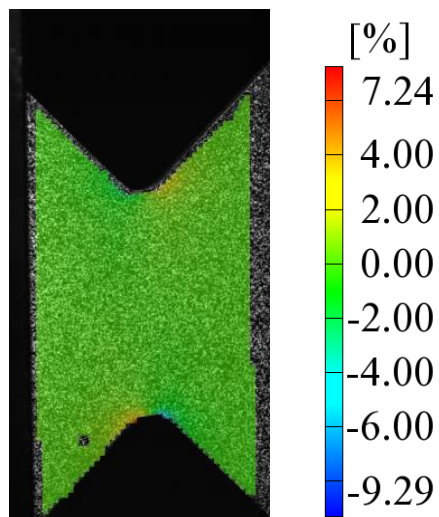
**Slika 6.7. Polje smičnih deformacija  $\varepsilon_{xy}$  kod uzorka debljine 2 mm. Deformacija je izražena kao bezdimenzijska veličina. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od:**

Smičnim opterećenjem uzorka debljine 2 mm pojavljuju se zone zadebljanja i stanjenja ispitnog uzorka (slika 6.8.). Može se primijetiti da do većeg širenja navedenih zona dolazi tek pri deformaciji uzorka od 30% (Slika 6.8.g)) iako vrijednosti zadebljanja i stanjenja stalno rastu. Na slikama 6.8.g) i h) asimetričnost zona stanjenja i zadebljanja postaje izraženija. Usporedbom slika 6.8.a) i 6.4.a) vidi se da su vrijednosti zadebljanja i stanjenja približno jednake za uzorke od 1 i 2 mm pri deformaciji od 1%. Međutim, za deformaciju od 1% uzorka debljine 1 mm je bila potrebna sila od 2,166 kN, a za uzorak debljine 2 mm je bila potrebna sila od 4892,1 kN.

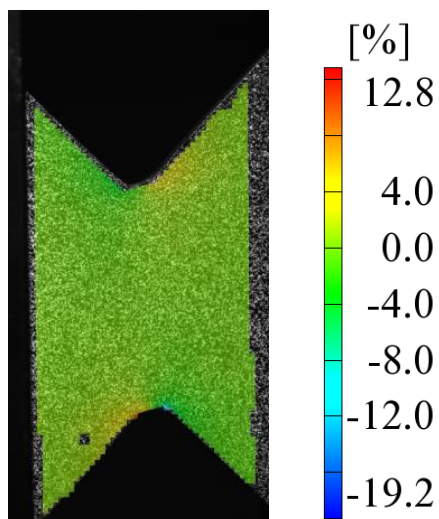




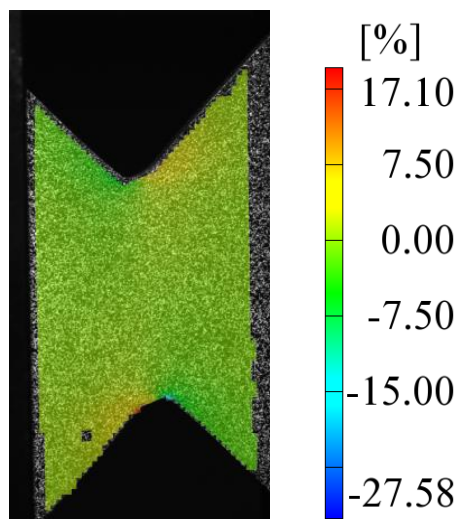
a) 1%



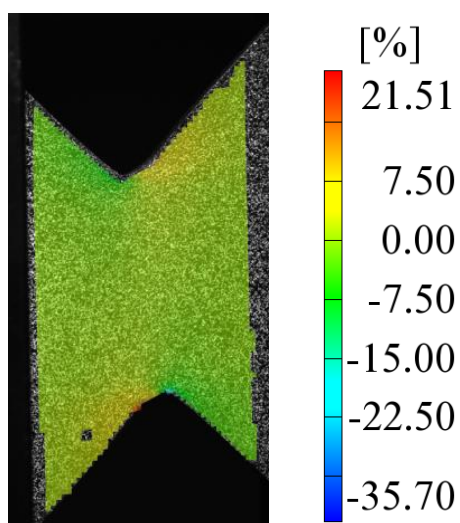
b) 5%



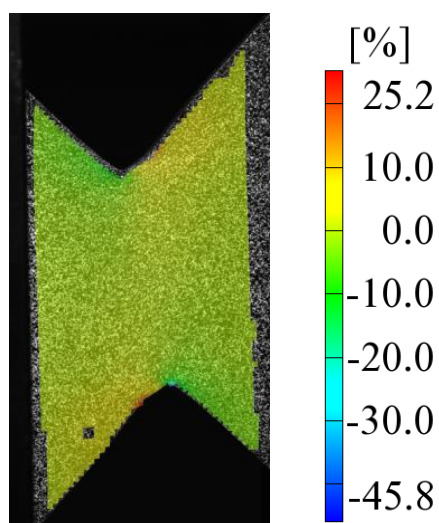
c) 10%



d) 15%

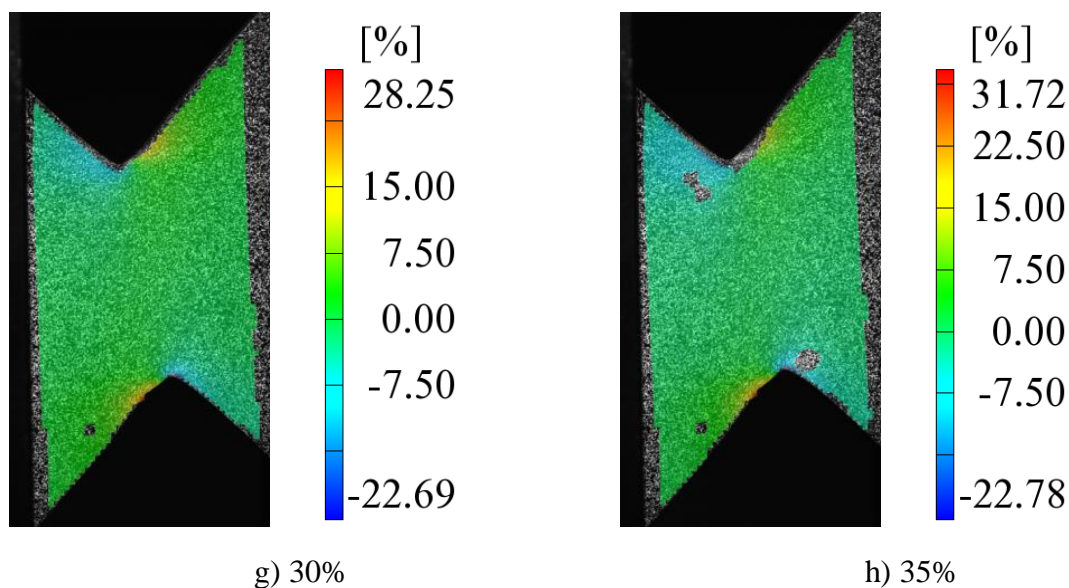


e) 20%



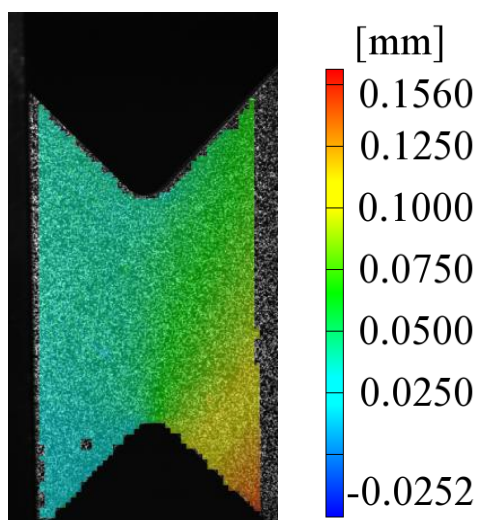
f) 25%



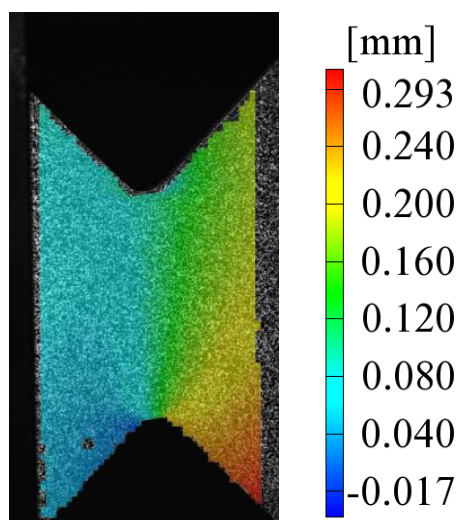


**Slika 6.8. Promjena smanjenja debljine uzorka s obzirom na povećanje narinutog opterećenja kod ispitnog uzorka debljine 2 mm. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od:**

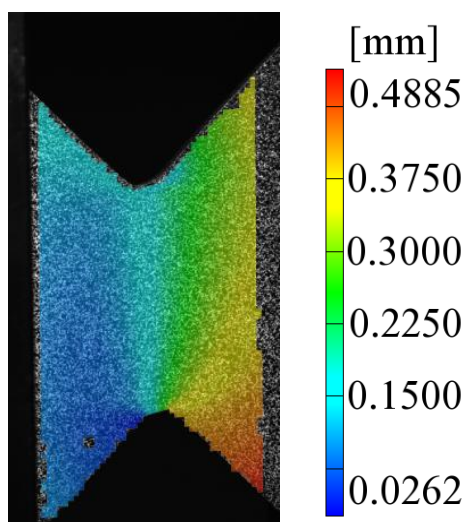
Slika 6.9. prikazuje izvan ravninske pomake po osi  $z$  za uzorak debljine 2 mm. Može se uočiti da su do 15% smičnih deformacija (Slika 6.9.d)) pomaci u smjeru osi  $z$  gotovo zanemarivi na lijevoj strani leptirastog uzorka. Na desnoj strani izvan ravninski pomaci postepeno rastu, a maksimalni pomak po  $z$  osi zabilježen je u donjem desnom kutu. Kod 35% deformiranosti uzorka (Slika 6.9.h)) može se uočiti da su pomaci po  $z$  osi približno jednaki nuli od desnog gornjeg do lijevog donjeg kuta promatrane zone interesa. U gornjem lijevom kutu izvan ravninski pomaci povećavaju se u negativnom smjeru osi  $z$ , dok si u donjem desnom kutu zabilježeni pomaci u pozitivnom smjeru osi  $z$ . Iz slika 6.9.h) i 6.5.f) vidljivo je kako se javljaju dva različita fenomena nestabilnosti kod leptirastog ispitnog uzorka (tj. izvijanja uslijed smičnog opterećenja). Kod uzorka debljine 1 mm (Slika 6.5.f)) zabilježeni su negativni pomaci u smjeru osi  $z$  u gornjem lijevom i donjem desnom kutu (tj. stvara se dijagonalni polukružni žlijeb).



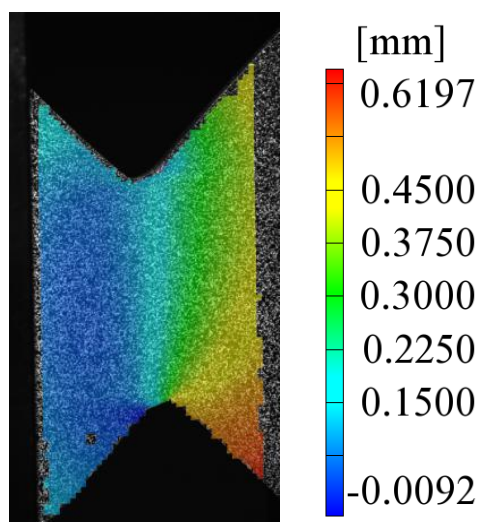
a) 1%



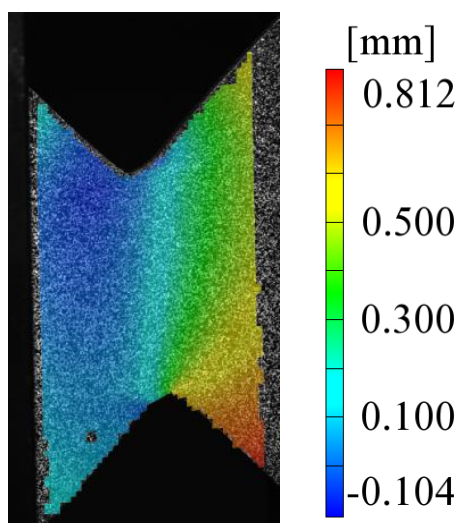
b) 5%



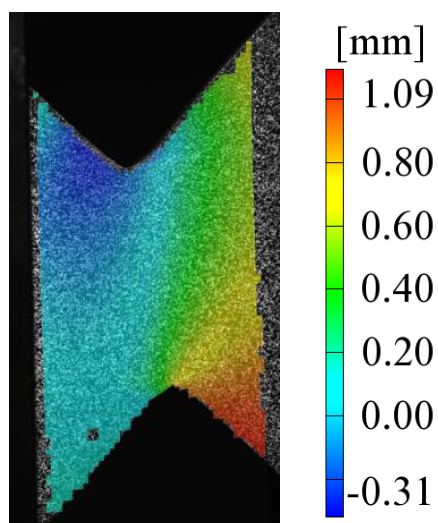
c) 10%



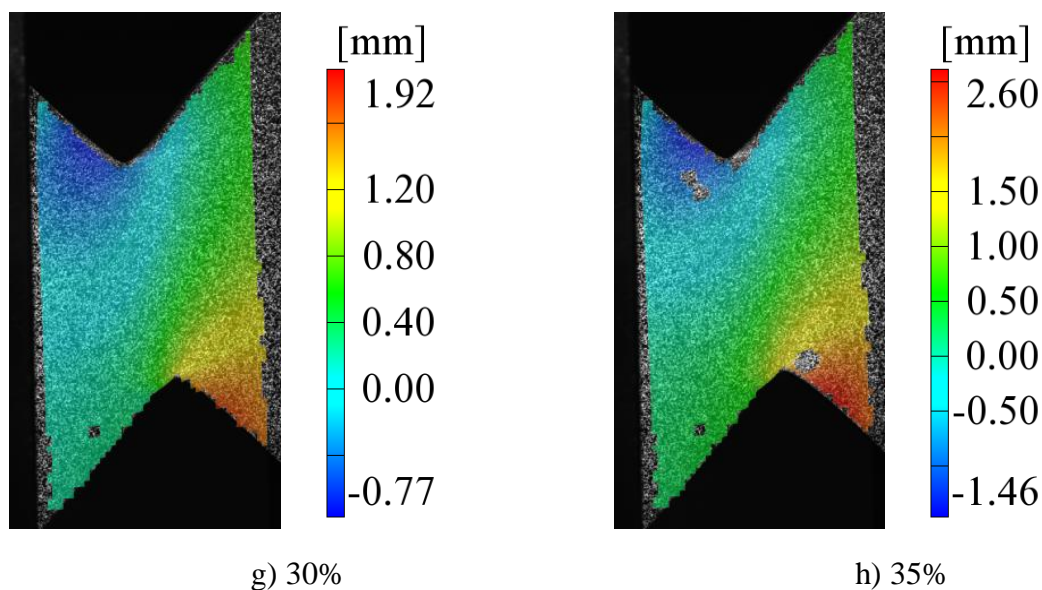
d) 15%



e) 20%



f) 25%



**Slika 6.9.** Promjena polja pomaka u smjeru osi z s obzirom na povećanje narinutog opterećenja kod uzorka debljine 2 mm. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od:

Iz tablice 6.2. se vidi da je deformacija uzorka od 1% nastala pod djelovanjem sile od 4892,1 kN. Maksimalno naprezanje od 158,10 MPa zabilježeno je kod djelovanja sile od 9389,25 kN. Iz tablice je vidljivo da su vrijednosti smičnih deformacija približno jednake ekvivalentnoj deformaciji uzorka do 10%. Razlika u njihovim vrijednostima nastaje zbog pojave deformacija uzrokovanim izvijanjem uzorka. Kao i kod uzorka debljine 1 mm, u točkama 1 i 4 nastaje zadebljanje, a u točkama 2 i 3 stanjenje uzorka. Kod 33,95% izmjerenih ekvivalentnih deformacija uzorka vrijednosti stanjenja u točkama 2 i 3 su primjetno veće od zadebljanja u točkama 1 i 4. Lom ispitnog uzorka (tj. asimetrične pukotine) nastao je na mjestima najvećeg stanjenja, odnosno u području točaka 2 i 3 (Slika 6.10.).

**Tablica 6.2.** Vrijednosti karakterističnih izmjerenih veličina kod smičnog mehaničkog ispitivanja za ispitni uzork debljine 2 mm.

| Br. slike | $\varepsilon$ [%] | $\varepsilon_{xy}$ [%] | Sila [kN] | Naprezanje [Mpa] | $TR_1$ [%] | $TR_2$ [%] | $TR_3$ [%] | $TR_4$ [%] |
|-----------|-------------------|------------------------|-----------|------------------|------------|------------|------------|------------|
| 61        | 0,978             | 0,978893               | 4892,1    | 82,38            | -0,122     | 0,105      | 0,230      | -0,160     |
| 157       | 4,986             | 4,86282                | 6358,5    | 107,07           | -1,207     | 0,928      | 1,797      | -1,75      |
| 316       | 10,004            | 9,515365               | 7399,5    | 124,6            | -2,424     | 2,323      | 3,723      | -3,497     |
| 481       | 15,004            | 13,95822               | 8078,15   | 136,02           | -3,449     | 3,890      | 5,785      | -5,019     |
| 627       | 20,008            | 18,22627               | 8580,05   | 144,47           | -4,488     | 5,623      | 7,911      | -6,352     |
| 756       | 25,001            | 22,27093               | 8953,7    | 150,77           | -5,422     | 7,269      | 10,022     | -7,579     |
| 884       | 30                | 26,16476               | 9211,4    | 155,11           | -6,463     | 9,18       | 12,201     | -8,232     |
| 1000      | 33,95             | 29,19134               | 9389,25   | 158,10           | -7,721     | 11,876     | 14,093     | -8,022     |



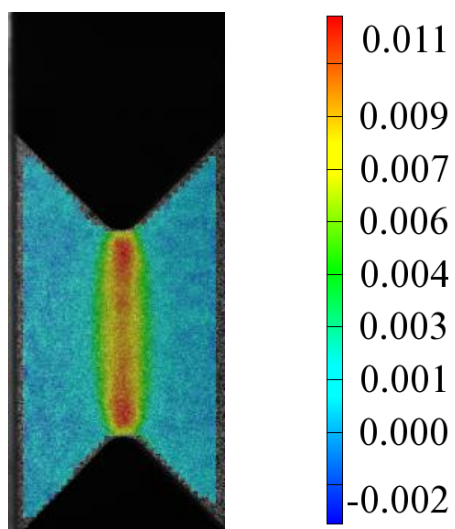
Slika 6.10. Deformirani ispitni uzorak debljine 2 mm

### 6.3. Analiza rezultata mjerenja cijelog polja pomaka za uzorak debljine 3 mm

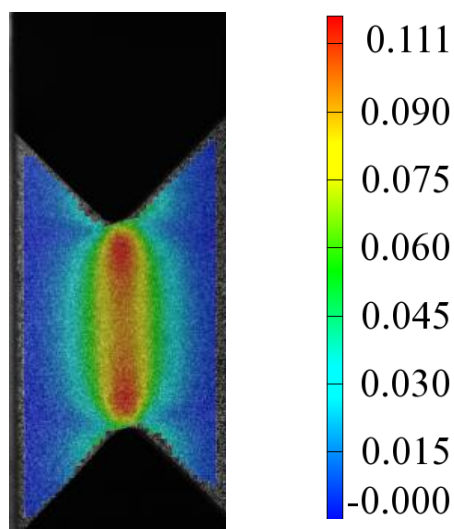
Kod ispitnog uzorka debljine 3 mm je također vidljivo da je maksimalna smična deformacija (Slika 6.11.) u vrhovima V zareza te da povećanjem opterećenja smična traka deformacija postaje homogena. Maksimalna smična deformacija  $\varepsilon_{xy}$  je otprilike jednaka ekvivalentnoj deformaciji uzorka sve do deformacije uzorka od 30%. Nakon toga se javljaju druga opterećenja (npr. zbog stanjenja uzorka) koja uzrokuju deformaciju uzorka. Kod deformacije uzorka od 90%, maksimalna smična deformacija iznosi 0,648.

Smičnim opterećenjem uzorka debljine 3 mm također dolazi do pojave asimetričnih zona zadebljanja i stanjenja uzorka uz korijen V zareza (Slika 6.12.). Može se primijetiti da su za uzorak debljine 3 mm vrijednosti maksimalnog zadebljanja i maksimalnog stanjenja podjednake. Povećanjem debljine uzorka ponašanje materijala je stabilnije. Budući da su pomaci po osi  $z$  vrlo mali zone stanjenja i zadebljanja su podjednakih vrijednosti. Najveće stanjenje je zabilježeno kod 90% ekvivalentne deformacije uzorka, a iznosi 35,66%.

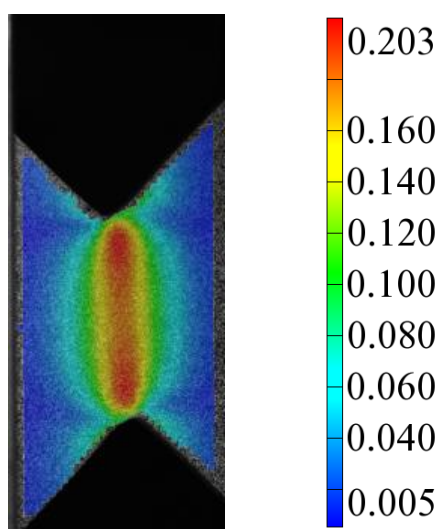




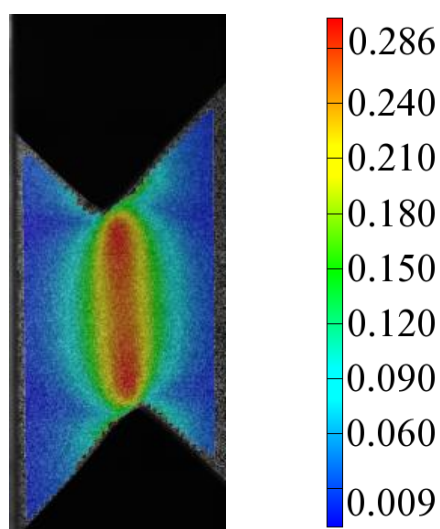
a) 1%



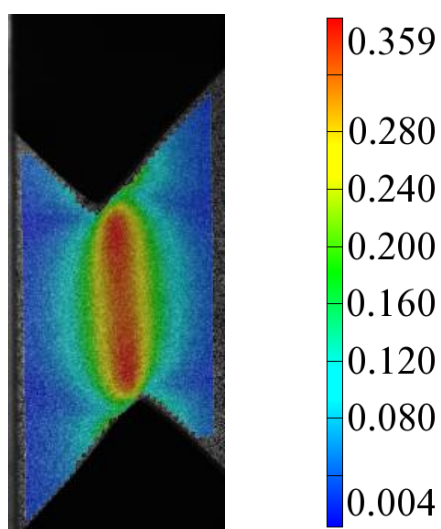
b) 10%



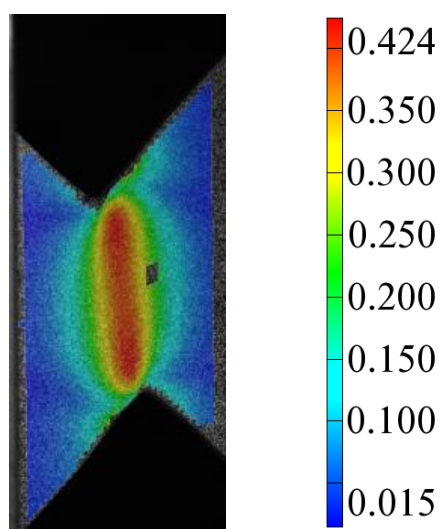
c) 20%



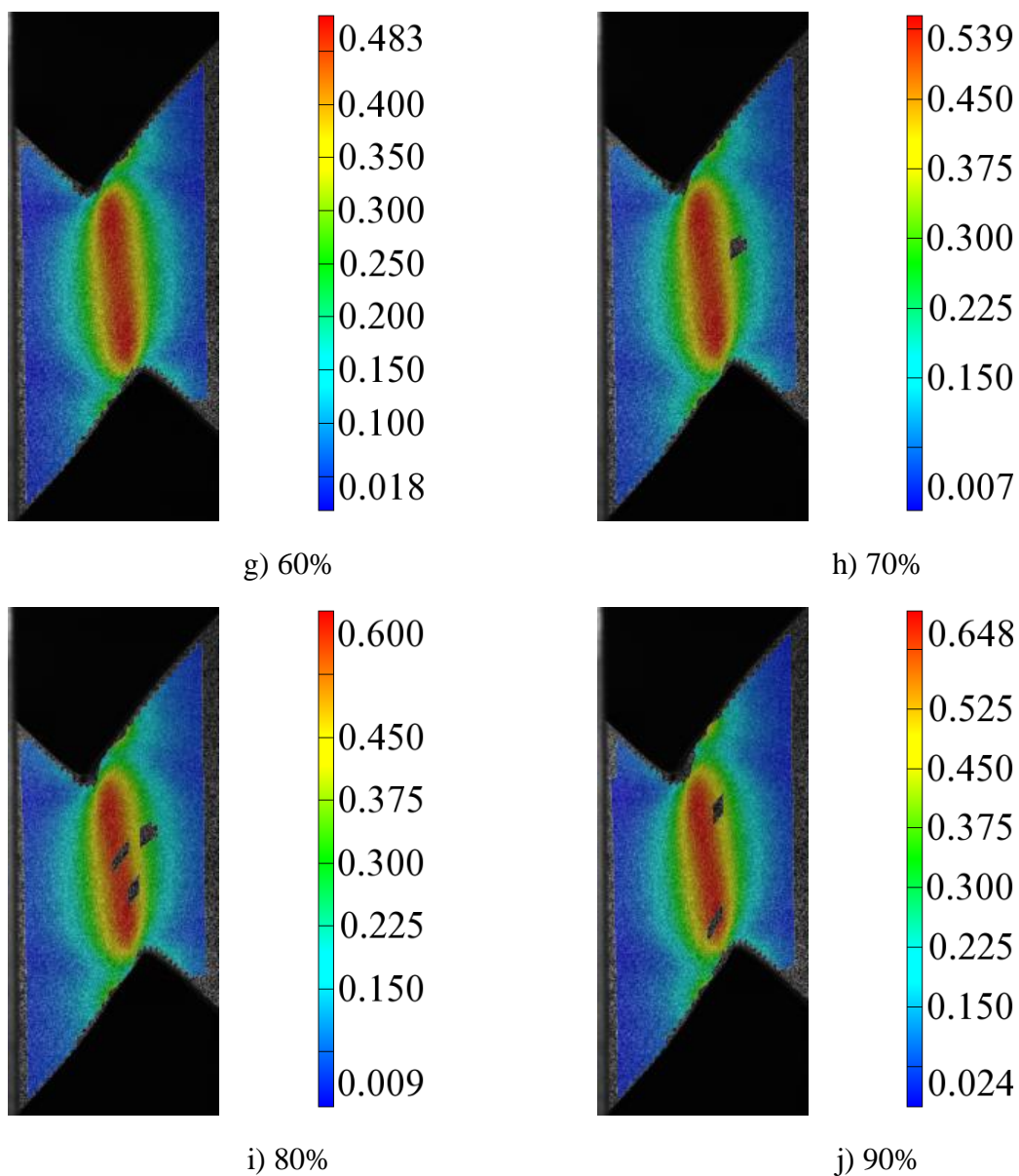
d) 30%



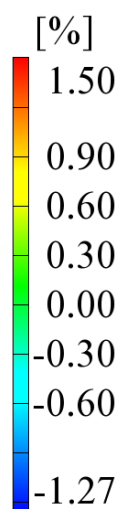
e) 40%



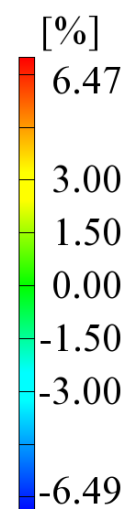
f) 50%



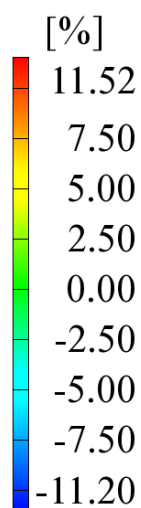
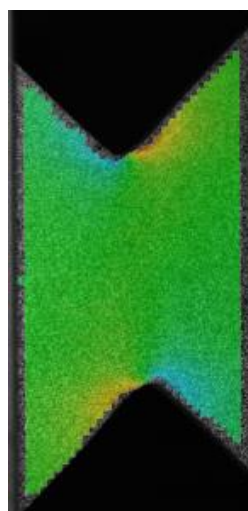
**Slika 6.11. Polje smičnih deformacija  $\epsilon_{xy}$  kod uzorka debljine 3 mm. Deformacija je izražena kao bezdimenzijska veličina. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od:**



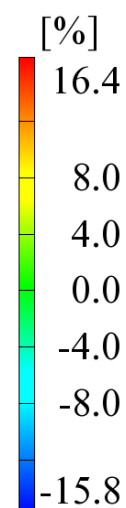
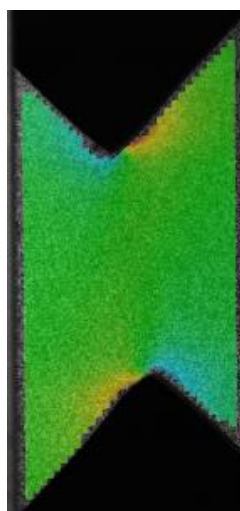
a) 1%



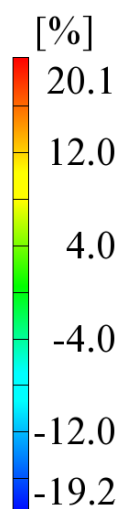
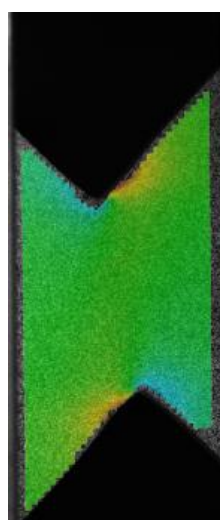
b) 10%



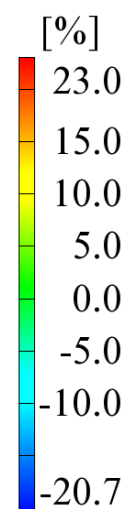
c) 20%



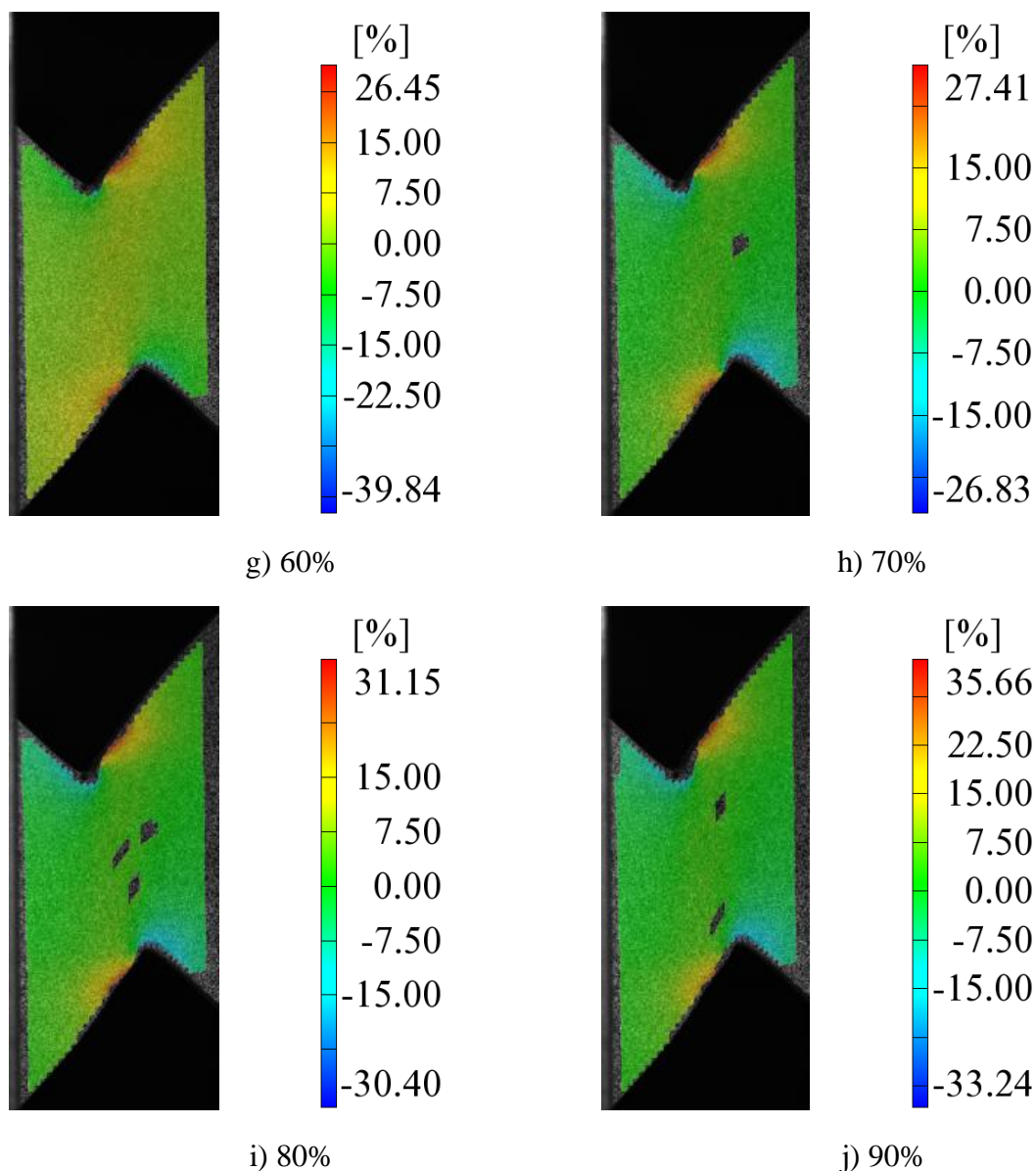
d) 30%



e) 40%



f) 50%

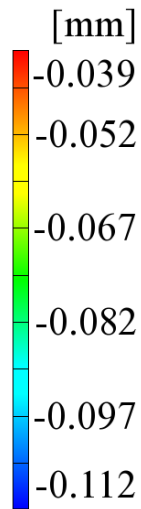


**Slika 6.12. Promjena smanjenja debljine uzorka s obzirom na povećanje narinutog opterećenja kod ispitnog uzorka debljine 3 mm. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od:**

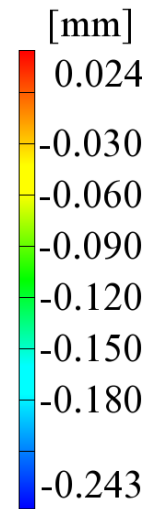
Na slici 6.13. prikazani su izvan ravninski pomaci uzorka. U desnom donjem kutu uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od 1% (Slika 6.13.a)) nastaju pomaci u negativnom smjeru. Povećanjem opterećenja ti se pomaci šire po desnoj strani uzorka. Maksimalni pomak u negativnom smjeru osi  $z$  nastaje pri deformaciji uzorka od 90% i iznosi 0,709 mm. Pri deformaciji od 20% (Slika 6.13.c)) nastaju izraženiji izvan ravninski pomaci u gornjem lijevom kutu leptirastog ispitnog uzorka. Usporedbom slika 6.5. i 6.9. može se zaključiti da se sa povećanjem debljine ispitnog uzorka pomaci po osi  $z$  manji. Ako se pogleda slika 6.13.j),



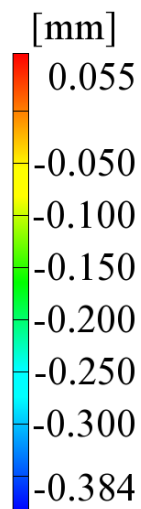
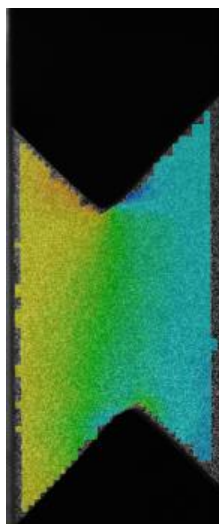
razlika između maksimalnog pozitivnog i negativnog pomaka je 1,2 mm, dok je kod uzorka debljine 2 mm (Slika 6.9.h)) navedena razlika 4,06 mm.



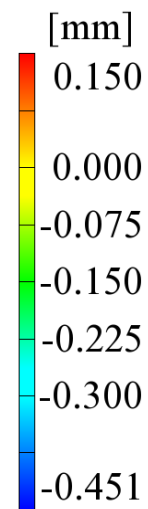
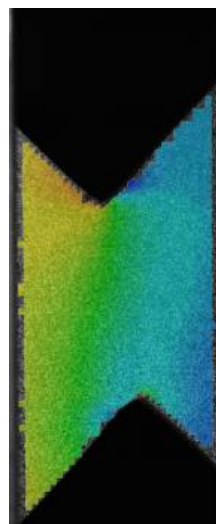
a) 1%



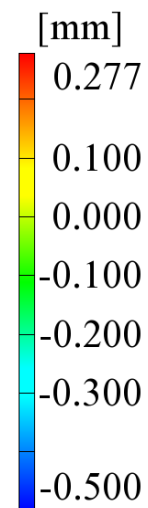
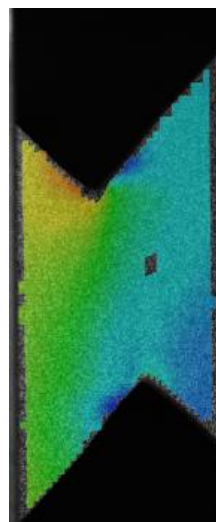
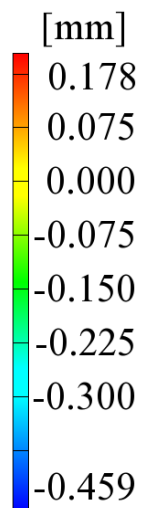
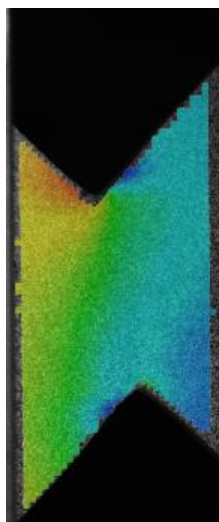
b) 10%

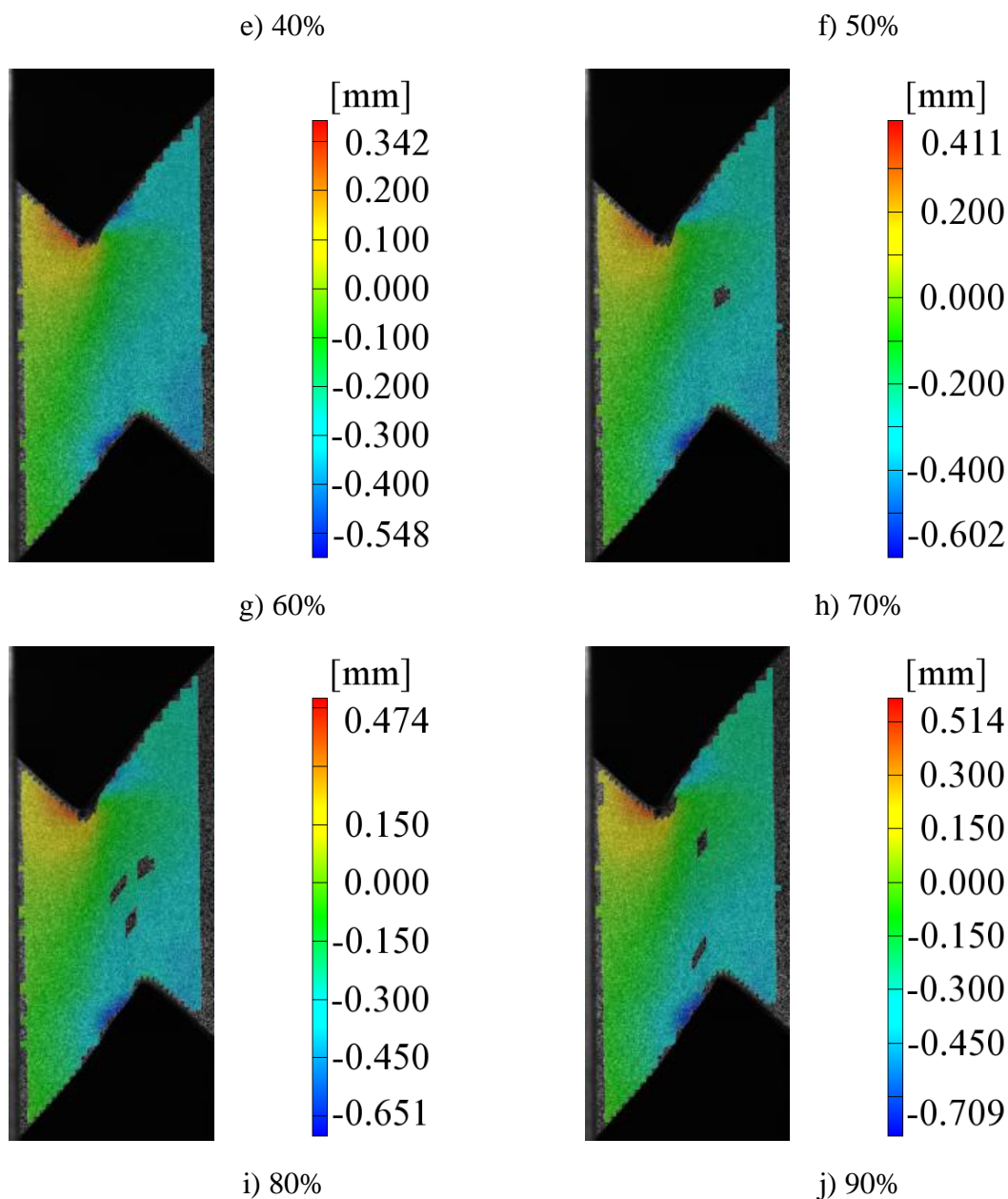


c) 20%



d) 30%





**Slika 6.13. Promjena polja pomaka u smjeru osi z s obzirom na povećanje narinutog opterećenja kod uzorka debljine 3 mm. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od:**

Vrijednosti narinute sile, odgovarajućih naprezanja i promjene debljine za ispitni uzorak debljine 3 mm nalaze se u tablici 6.3. Deformacija od 1% za uzorak debljine 3 mm je postignuta kod narinute sile od 9,364 kN. Maksimalno naprezanje iznosilo je 274,556 MPa, a maksimalna sila 16,305 kN. Vrijednosti zadebljanja uzorka u točkama 1 i 4 su približno jednake kod deformacije od 1%, no nakon toga se zadebljanje u točki 4 naglo povećava. Pri deformaciji od 90% zadebljanje u točki 1 je iznosilo 6,741%, a u točki 4 13,331%. Iz mjerenih rezultata može se zaključiti kako je zadebljanje u točki 4 dva puta veće od zadebljanja u točki 1. Smanjenje debljine uzorka u točki 3 također brže raste nego u točki 2.

Kod ekvivalentne deformacije ispitnog uzorka od 90 % smanjenje debljine uzorka u točki 2 je iznosilo 12,646%, a u točki 3 17,142%. Promatranjem slika 6.14. može se zaključiti da je početna pukotina nastala u blizini točke 3.

**Tablica 6.3. Vrijednosti karakterističnih izmjerenih veličina kod smičnog mehaničkog ispitivanja za ispitni uzorak debljine 3 mm.**

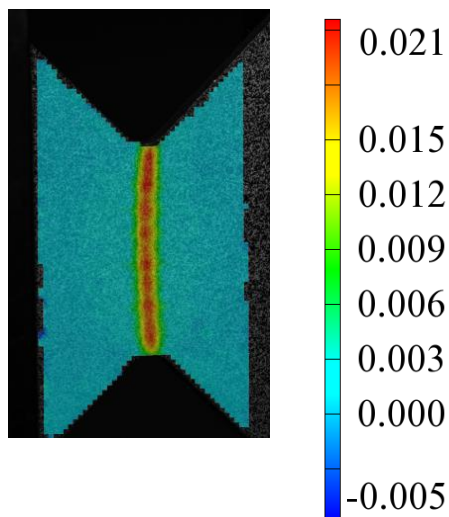
| Br. slike | $\varepsilon$ [%] | $\varepsilon_{xy}$ [%] | Sila [kN] | Naprezanje [Mpa] | $TR_1$ [%] | $TR_2$ [%] | $TR_3$ [%] | $TR_4$ [%] |
|-----------|-------------------|------------------------|-----------|------------------|------------|------------|------------|------------|
| 86        | 0,973             | 0,93964                | 9,364     | 157,672          | -0,152     | 0,044      | 0,076      | -0,135     |
| 294       | 10,007            | 9,410135               | 11,801    | 198,705          | -1,779     | 0,947      | 1,271      | -2,817     |
| 513       | 19,983            | 17,94621               | 13,223    | 222,662          | -2,879     | 2,131      | 3,216      | -5,141     |
| 708       | 30,011            | 25,73884               | 14,119    | 237,749          | -3,833     | 3,495      | 5,474      | -7,045     |
| 879       | 40                | 32,80691               | 14,741    | 248,211          | -4,052     | 5,166      | 7,633      | -8,436     |
| 1030      | 50                | 39,48244               | 15,215    | 256,191          | -4,385     | 6,805      | 9,953      | -9,411     |
| 1156      | 60,109            | 45,97153               | 15,583    | 262,388          | -4,267     | 8,410      | 12,02      | -10,411    |
| 1259      | 69,97             | 51,91165               | 15,871    | 267,24           | -4,193     | 10,004     | 13,749     | -11,436    |
| 1350      | 80,062            | 57,90774               | 16,112    | 271,296          | -3,892     | 11,376     | 15,541     | -12,385    |
| 1425      | 90,055            | 63,29966               | 16,305    | 274,556          | -6,741     | 12,646     | 17,142     | -13,331    |



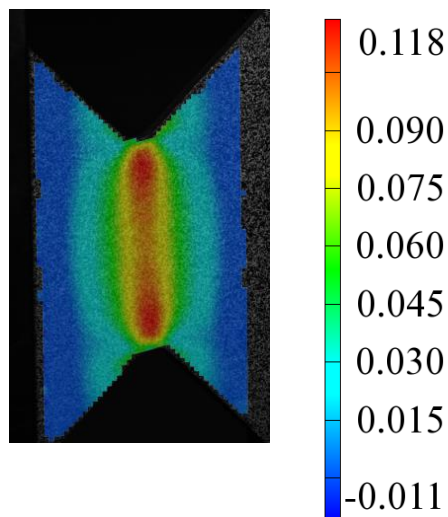
**Slika 6.14. Deformirani uspitni uzorak debljine 3 mm [16]**

#### **6.4. Analiza rezultata mjerenja cijelog polja pomaka za uzorak debljine 4 mm**

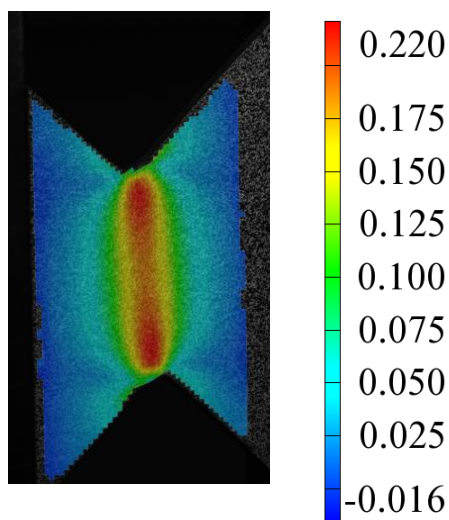
Na slici 6.15. prikazana su polja  $\varepsilon_{xy}$  deformacija pri smičnom opterećenju leptirastog ispitnog uzorka debljine 4 mm. Kao i kod prethodna tri uzorka, može se primijetiti traka smičnih deformacija između dva V zareza. Također, povećanjem opterećenja posmične deformacije unutar trake smičnih deformacija postaju uniformnije, a oko trake se šire simetrično s obzirom na y os uzorka. Maksimalna smična deformacija je približno jednaka ekvivalentnoj deformaciji uzorka do deformacije od 50%. Nakon toga ekvivalentna deformacija uzorka postaje veća zbog javljanja drugih opterećenja u uzorku (promjena debljine uzorka).



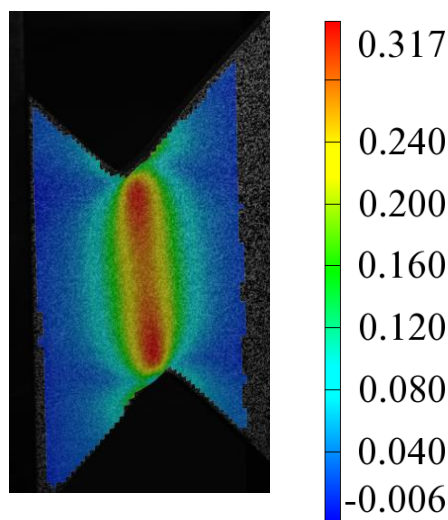
a) 1%



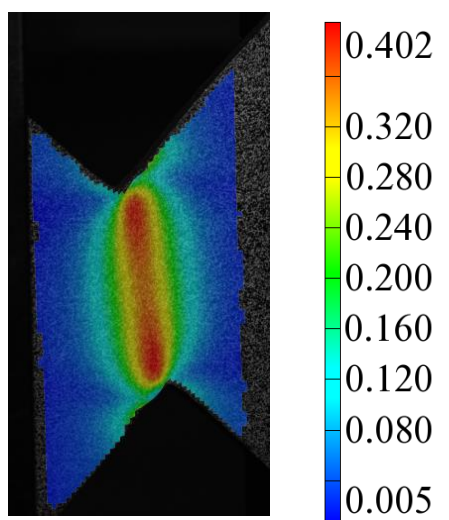
b) 10%



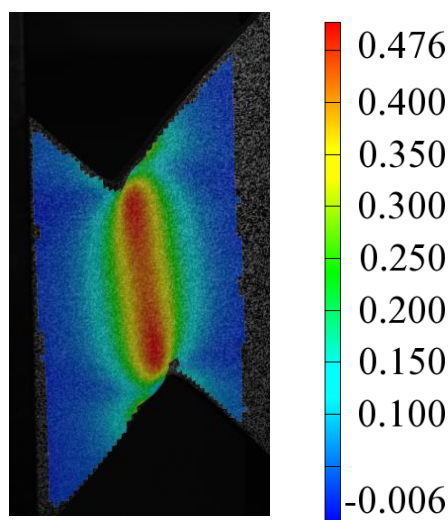
c) 20%



d) 30%

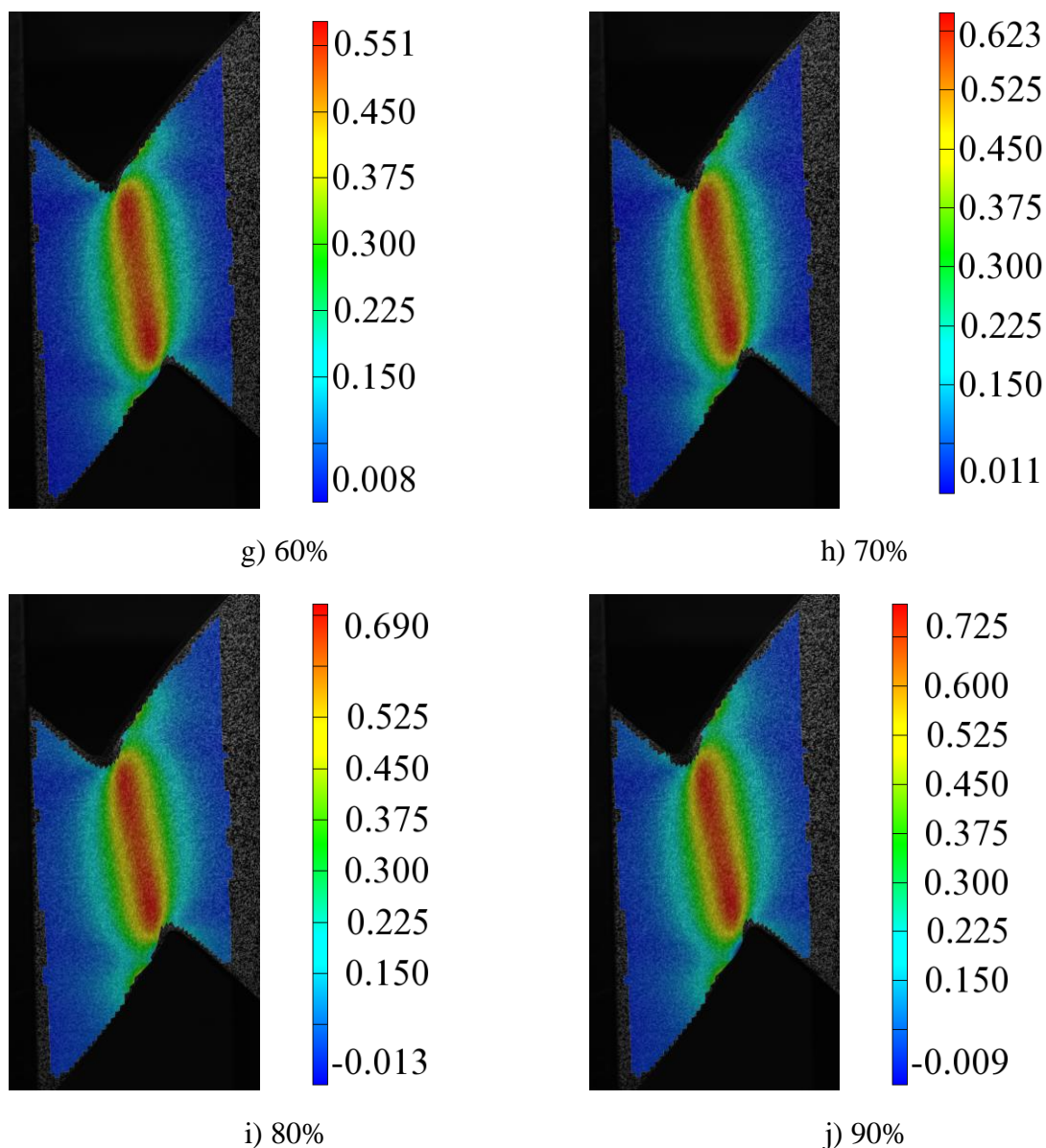


e) 40%



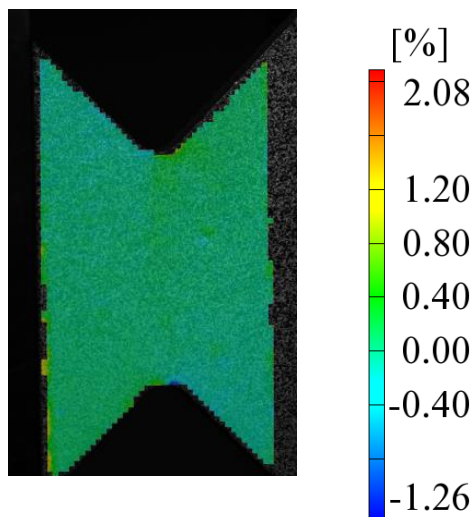
f) 50%



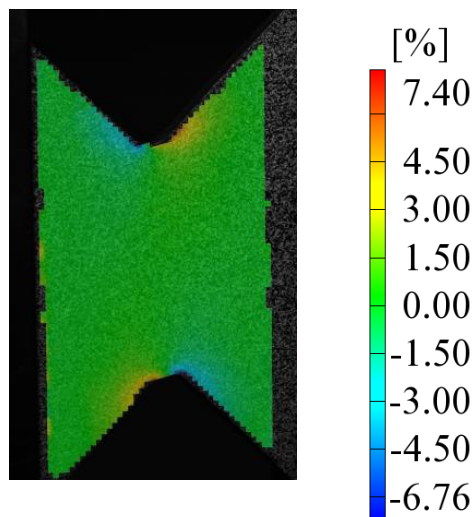


**Slika 6.15. Polje smičnih deformacija  $\varepsilon_{xy}$  kod uzorka debljine 4 mm. Deformacija je izražena kao bezdimenzijska veličina. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od:**

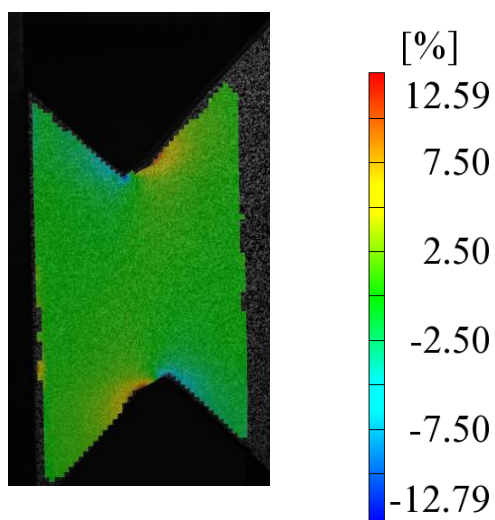
Slika 6.16. prikazuje smanjenje debljine uzorka pri smičnom opterećenju. Zadebljanja i stanjenja su asimetrična s obzirom na osi  $x$  i  $y$ . S povećanjem opterećenja njihovi iznosi rastu i približno su istih vrijednosti. Osim toga, zone zadebljanja i stanjenja se šire s povećanjem opterećenja. Najveća promjena debljine uzorka nastaje kod 90% deformacije uzorka i iznosi 32,76%.



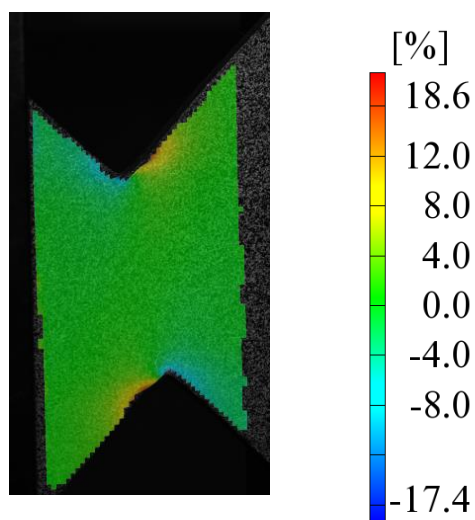
a) 1%



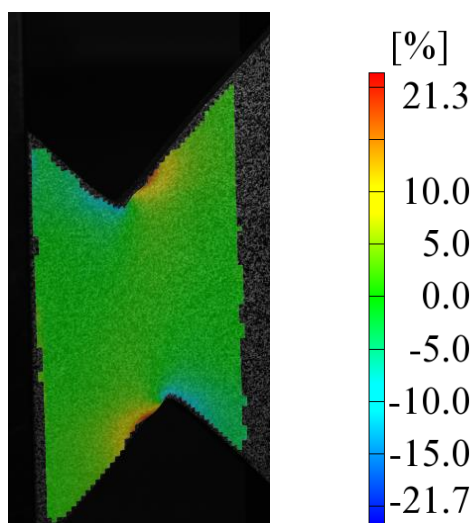
b) 10%



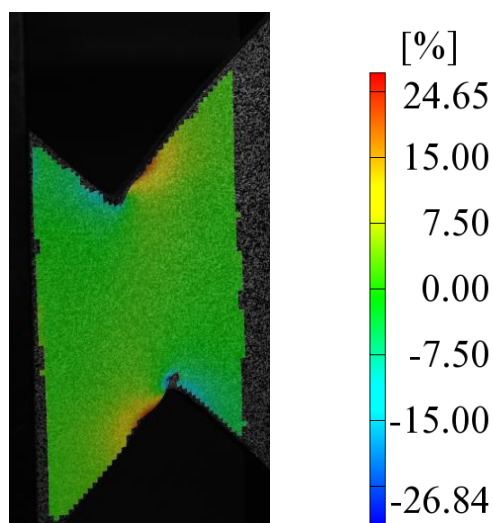
c) 20%



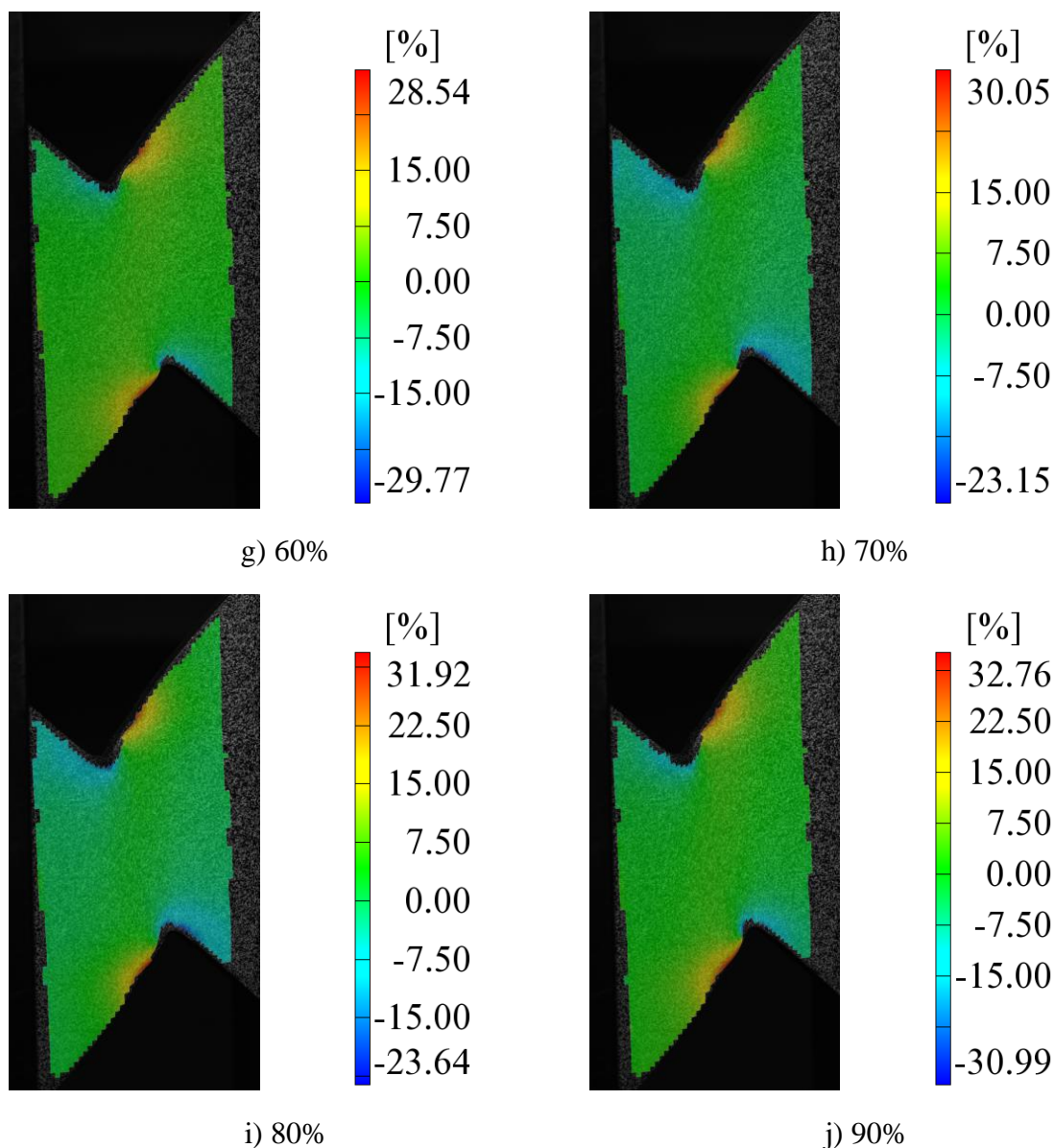
d) 30%



e) 40%

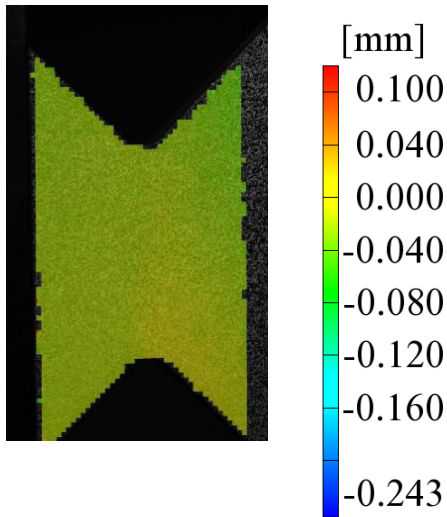


f) 50%

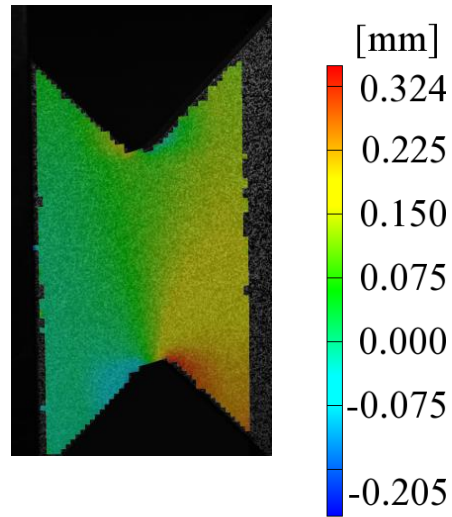


**Slika 6.16. Promjena smanjenja debljine uzorka s obzirom na povećanje narinutog opterećenja kod ispitnog uzorka debljine 4 mm. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od:**

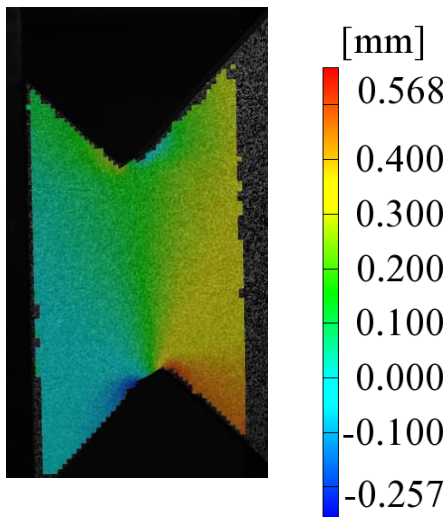
Smičnim opterećenjem uzorka debljine 4 mm pomaci u smjeru osi  $z$  su zanemarivo mali kod deformacije od 1% (Slika 6.17.). Povećanjem opterećenja u donjem lijevom dijelu uzorka javljaju se negativni pomaci, a u donjem desnom dijelu izmjereni su pozitivni pomaci u smjeru osi  $z$  (Slika 6.17.b)). Negativni pomaci su na lijevom dijelu ispitnog uzorka vrlo mali. Usporedbom s izmjerenim poljima pomaka na slici 6.17.j) vidi se da su za 90% deformacije uzorka izvan ravninski pomaci na lijevoj strani približni jednaki nuli, a na desnoj strani veći od 1 mm. Osim toga u središnjem dijelu leptirastog ispitnog uzorka zabilježen je pomak od 0,75 mm u smjeru osi  $z$ .



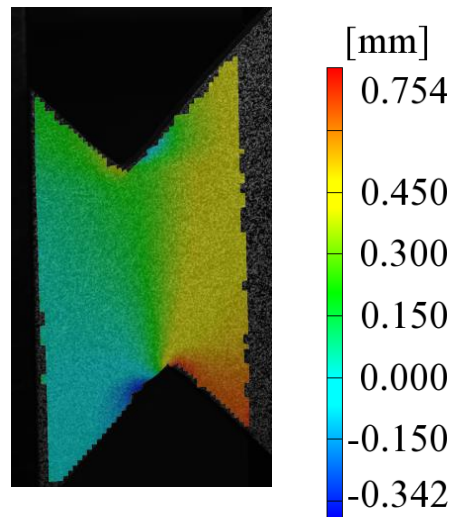
a) 1%



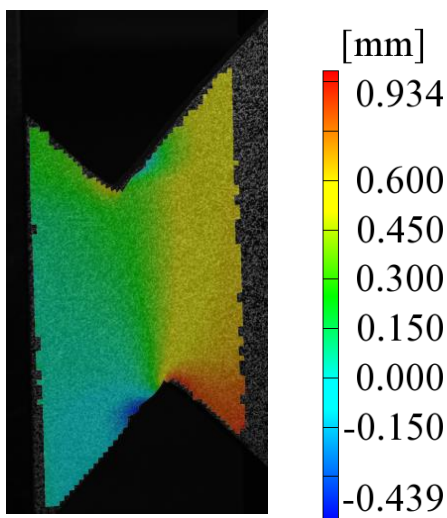
b) 10%



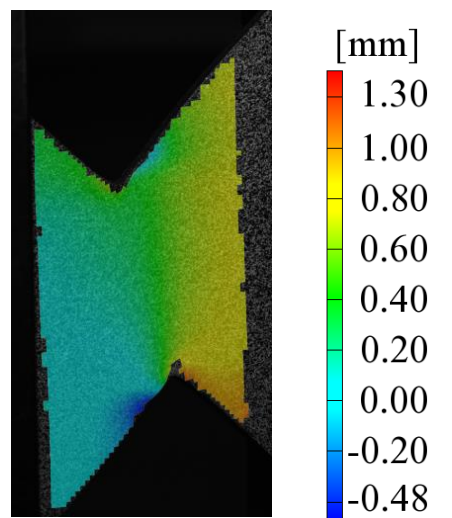
c) 20%



d) 30%

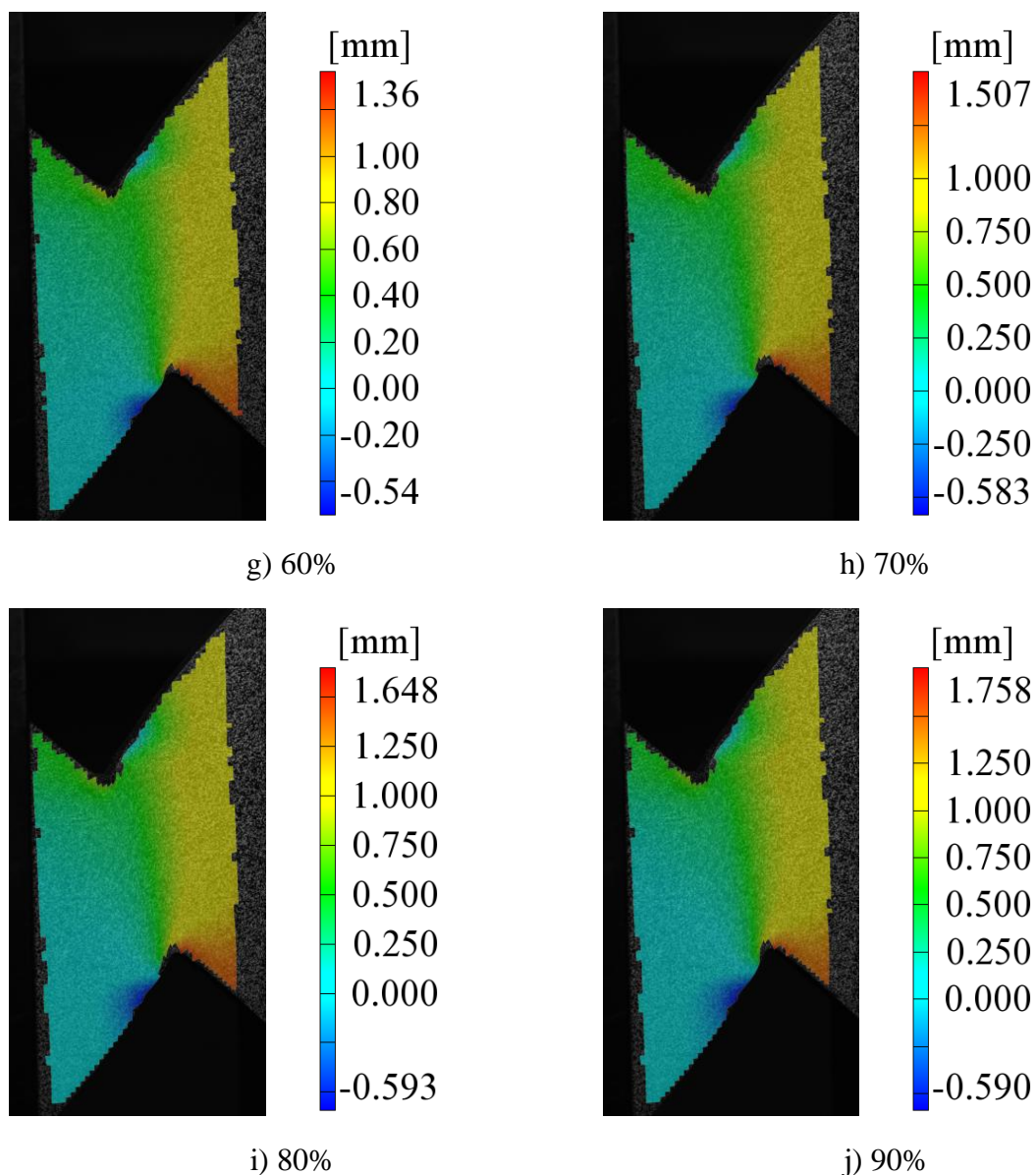


e) 40%



f) 50%



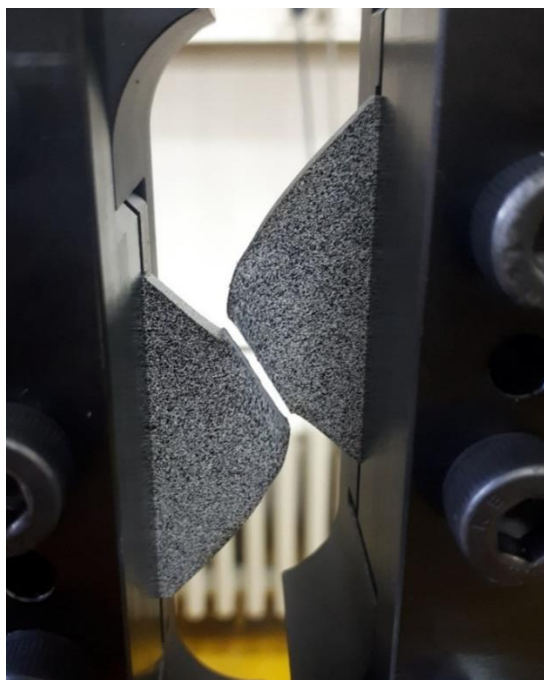


**Slika 6.17. Promjena polja pomaka u smjeru osi z s obzirom na povećanje narinutog opterećenja kod uzorka debljine 4 mm. Prikaz uzorka pri ekvivalentnoj deformaciji od:**

Iz tablice 6.4. se vidi da je za 1% ekvivalentne deformacije ispitnog uzorka debljine 4 mm potrebna sila od 13,523 kN. Do 90% ekvivalentne deformacije uzorka došlo je uslijed sile od 25,234 kN. Najveće naprezanje iznosi 280,249 MPa, dok je za 3 mm najveće naprezanje jednako 274,556 MPa. Lom uzorka (Slika 6.18.) je nastao na mjestu najvećeg stanjenja. Iz tablice 6.4. se vidi da je najveće stanjenje u točki 3 te da iznosi 18,283%.

**Tablica 6.4. Vrijednosti karakterističnih izmjerenih veličina kod smičnog mehaničkog ispitivanja za ispitni uzorak debljine 4 mm**

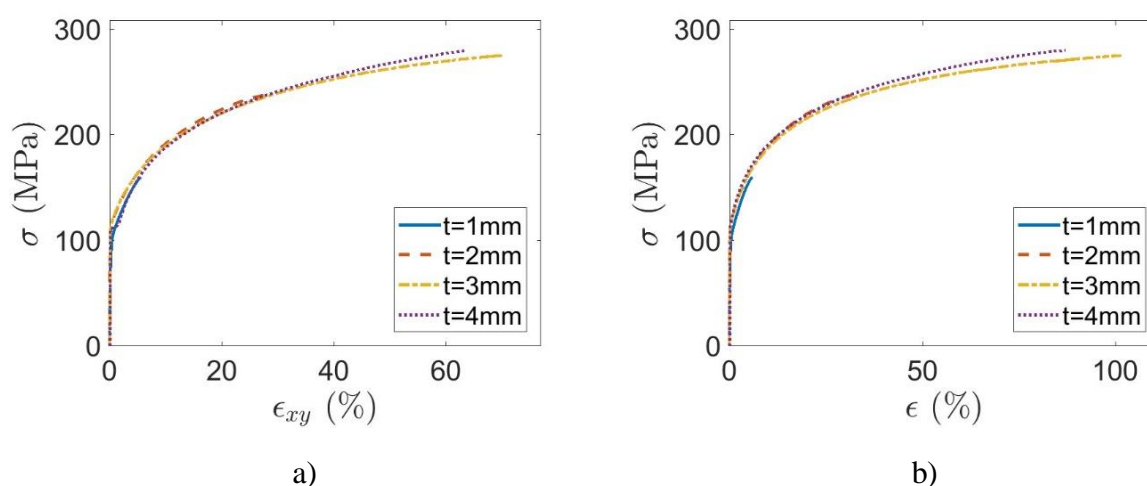
| Br. slike | $\varepsilon$ [%] | $\varepsilon_{xy}$ [%] | Sila [kN] | Naprezanje [Mpa] | $TR_1$ [%] | $TR_2$ [%] | $TR_3$ [%] | $TR_4$ [%] |
|-----------|-------------------|------------------------|-----------|------------------|------------|------------|------------|------------|
| 164       | 0,989             | 1,070637               | 13,523    | 127,797          | -0,0862    | 0,403      | 0,269      | -0,147     |
| 429       | 9,995             | 9,440153               | 18,507    | 190,867          | -1,828     | 1,903      | 1,846      | -2,505     |
| 667       | 19,983            | 18,08617               | 20,649    | 218,986          | -3,006     | 3,845      | 4,076      | -4,252     |
| 876       | 30,029            | 26,19384               | 21,960    | 236,325          | -4,001     | 6,277      | 6,742      | -5,578     |
| 1061      | 39,923            | 33,739                 | 22,878    | 248,57           | -4,926     | 8,792      | 9,272      | -6,557     |
| 1227      | 50,012            | 40,80258               | 23,589    | 258,094          | -5,762     | 11,107     | 11,693     | -7,305     |
| 1358      | 60,003            | 47,51449               | 24,182    | 266,061          | -6,546     | 13,104     | 13,913     | -7,942     |
| 1467      | 70,032            | 53,90026               | 24,658    | 272,440          | -7,004     | 14,897     | 15,802     | -8,750     |
| 1558      | 80,016            | 60,05026               | 25,057    | 277,762          | -7,379     | 16,442     | 17,457     | -9,427     |
| 1600      | 87,11             | 63,27193               | 25,234    | 280,249          | -7,539     | 17,179     | 18,283     | -9,693     |

**Slika 6.18. Deformirani ispitni uzorak debljine 4 mm**

## 7. DISKUSIJA

Nakon provedbe eksperimenta i analize rezultata mjerenja cijelog polja pomaka i polja deformacija u ovom poglavlju analizirano je gužvanje leptirastog ispitnog uzorka. Uslijed smičnog opterećenja identificiran je odziv materijala s obzirom na različite debljine ispitnih uzorka izrađenih od konstrukcijskog čelika DC01.

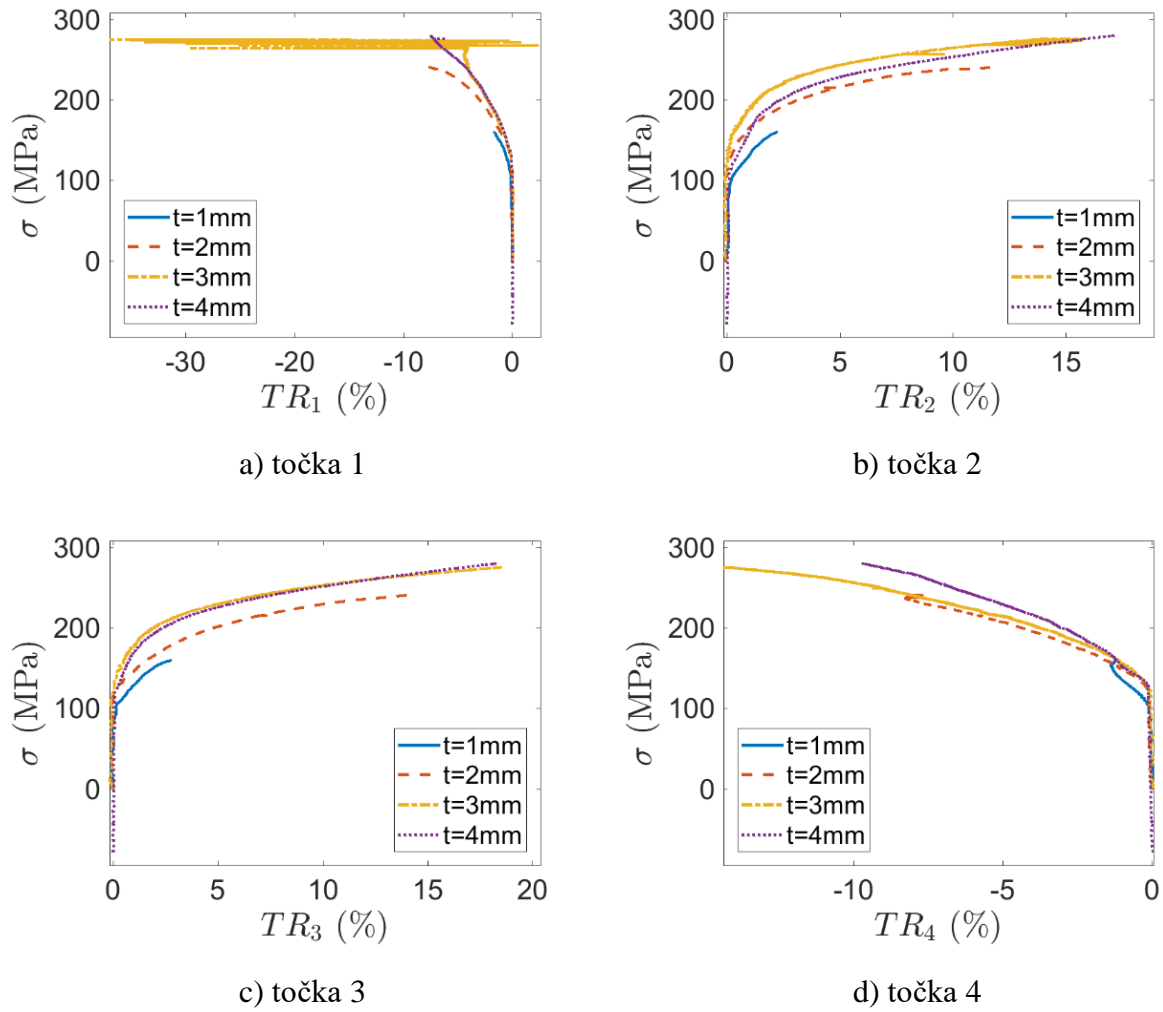
Slika 7.1.a) prikazuje ovisnost smičnih deformacija o naprezanju, a slika 7.1.b) ovisnost ekvivalentne deformacije uzoraka o naprezanju. Može se primijetiti kako kod svih uzoraka nelinearno ponašanje materijala nastaje iznad naprezanja od 100 MPa. Ispitni uzorak debljine 1 mm promatran je do ekvivalentne deformacije od 6% budući da je nakon toga identificirano izvijanje uzorka. Također, kod uzorka debljine 2 mm nakon deformacije od 35% pojavljuju se nepravilnosti uzrokovane izvijanjem pa je uzorak promatran do te vrijednosti. Usporedbom dijagrama može se primijetiti da je kod uzoraka debljine 3 i 4 mm pri istom opterećenju ekvivalentna deformacija znatno veća od smične deformacije. Do toga dolazi zbog pojave drugih opterećenja poput promjene debljine uzorka. Najveća smična deformacija je zabilježena kod uzorka debljine 3 mm te iznosi 70%. Pri istom opterećenju ekvivalentna deformacija uzorka iznosi 105,6%. Može se primijetiti da se krivulje za uzorke debljine 2, 3 i 4 mm preklapaju do 35% smične deformacije uzorka. Nakon toga se za isto opterećenje kod uzorka debljine 4 mm pojavljuju manje deformacije nego kod uzorka debljine 3 mm.



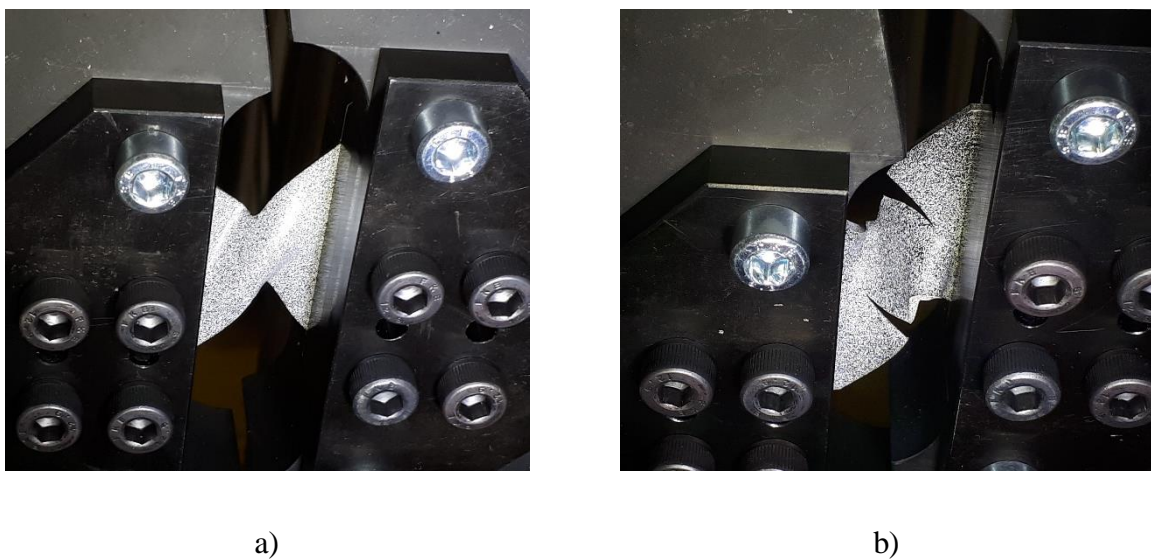
Slika 7.1. Prikaz dijagrama ovisnosti: a) smične deformacije o naprezanju, b) ekvivalentne deformacije o naprezanju

Dijagrami na slici 7.2. prikazuju smanjenje debljine, odnosno gužvanje materijala u karakterističnim točkama (Slika 6.1.) na svakom uzorku u ovisnosti o naprezanju. Pozitivne vrijednosti smanjenja debljine (TR – eng. *thickness reduction*) prikazuju smanjenje debljine uzorka (točke 2 i 3) dok negativne vrijednosti prikazuju zadebljanje ispitnog uzorka (točke 1 i 4). Može se uočiti da kod svih uzoraka dolazi do nelinearnog ponašanja iznad naprezanja od 100 MPa. To potvrđuje vrijednosti iz dijagrama sa slike 7.1. koji također prikazuje nelinearno ponašanje materijala iznad naprezanja od 100 MPa. U točki 1 (Slika 7.2.a)) došlo je do nestabilnosti uzorka debljine 3 mm zbog nemogućnosti algoritma da izračuna pomak fasete uslijed velikih pomaka uzorka. Usporedbom dijagrama za točke 2 i 3 (Slika 7.2.b) i 7.2.c)) vidljivo je da je stanjenje uzoraka u asimetričnim zonama približno jednako. Međutim, zadebljanje u točkama 1 i 4 se razlikuje. Zadebljanje uzoraka debljine 1 i 2 mm u točkama 1 (Slika 7.2.a) i 4 (Slika 7.2.d) je približnog iznosa dok se zadebljanje uzorka debljine 4 mm u istim točkama razlikuje za otprilike 2%. Također, kod uzorka debljine 3 mm zadebljanje je puno veće u točki 1 nego u točki 4. U točki 3 (Slika 7.2.c) može se primijetiti da se krivulje za uzorke debljine 3 i 4 mm podudaraju. Iz toga se može zaključiti da je stanjenje uzoraka debljine 3 i 4 mm u točki 3 približno jednakog iznosa. U točki 4 (Slika 7.2.d)) kod uzoraka debljine 1 i 2 mm na krajevima krivulja dolazi do male promjene putanje, odnosno smanjenja zadebljanja. To je posljedica nestabilnosti odnosno izvijanja ispitnog uzorka (Slika 7.3.). Zbog velikih pomaka uzrokovanih izvijanjem algoritam nije u mogućnosti izračunati sve pomake i deformacije na površini ispitnog uzorka.

Slika 7.2. pokazuje da je gužvanje materijala moguće izmjeriti pri smičnom ispitivanju leptirastih uzoraka. Međutim, kako bi se gužvanje bolje proučilo predlaže se korištenje većeg mjernog objekta.



Slika 7.2. Dijagram naprezanja i smanjenja debljine leptirastog ispitnog uzorka u različitim točkama (Slika 6.1.)



Slika 7.3. Prikaz izvijanja uzorka debljine: a) 1 mm, b) 2 mm

## 8. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedeno je ispitivanje leptirastih uzoraka opterećenih na smik koristeći modificirani višeosni Arcan prihvata. U obzir su uzeti ispitani su uzorci debljina 1, 2, 3 i 4 mm izrađeni od konstrukcijskog čelika DC01. Ispitivanje je provedeno na jednoosnoj kvazi-statičkoj elektromehaničkoj kraljici Beta 50-5 (Messphysik Austrija) s brzinom 0.5 mm/min. Cilj ovog rada bio je odrediti i analizirati ovisnost izvan ravninskih pomaka i deformacija s obzirom na debljinu ispitnog uzorka.

Polja pomaka i deformacija na ispitnim uzorcima izmjerena su pomoću stereo optičkog mjernog sustava Aramis temeljenog na metodi korelacije digitalne slike. Prije provedbe eksperimenata na površinu ispitnih uzoraka sprejem je nanosena karakteristična tekstura (tj. crno bijeli raster) koja se koristi za primjenu metode korelacije digitalne slike. Tijekom mehaničkog ispitivanja zabilježen je niz slika pomoću predloženog stereo-vizijskog sustava. DIC algoritam temeljen na korelacijskoj funkciji uspoređuje referentnu sliku (tj. slika zabilježenu u neopterećenom stanju) s deformiranim slikama površine ispitnog uzorka. Rezultat DIC algoritma su izmjerena cijela polja pomaka i deformacija u promatranoj zoni interesa pojedinog uzorka (tj. između dva V zarezata).

S ciljem određivanja izvan ravninskog savijanja i gužvanja materijala za uzorke različite debljine određeno je polje smičnih deformacija, polje pomaka po osi okomitoj na promatranu površinu uzorka te smanjenje debljine uzorka. Osim toga, za sve uzorke postavljena su četiri karakteristične točke uz rub V zarezata u kojima je mjerena promjena debljine materijala, dok je u središte svakog uzorka postavljena točka u kojoj su mjerene posmične deformacije. Pri smičnom opterećenju između vrhova V zarezata leptirastih uzoraka formirana je smična deformacijska traka (eng. *shear band*). Maksimalne smične deformacije se javljaju u blizini vrhova V zarezata, dok je u središnjoj zoni deformacija homogeno distribuirana. S povećanjem narinutog opterećenja smična deformacijska traka postaje homogenija, odnosno vrijednosti u vrhovima V zarezata i u središtu trake postaju približno jednake. Smične deformacije se s povećanjem opterećenja također šire i oko trake simetrično s obzirom na os koja prolazi kroz vrhove V zarezata. Ekvivalentna i smična deformacija kod uzoraka debljine 1 i 2 mm su približno jednake za prikazane rezultate (prije pojave nestabilnosti uzorka). Kod uzorka debljine 3 mm smične deformacije su dominantne do deformacije uzorka od 30%. Nakon toga

se javljaju druga opterećenja pa ekvivalentna deformacija postaje veća. Također, kod uzorka debljine 4 mm smične deformacije dominiraju do deformacije uzorka od 50%.

Tijekom ispitivanja na uzorcima je uočen fenomen gužvanja, odnosno promjena debljine materijala u blizini V zarez. Zone stanjenja i zadebljanja asimetrične su s obzirom na vertikalnu i horizontalnu os promatrane površine ispitnog uzorka. Osim toga, s povećanjem opterećenja uzorka šire se i zone gužvanja materijala. Na mjestima gdje je došlo do smanjenja debljine materijala inicirana je pukotina. Također, uočena su dva različita fenomena nestabilnosti leptirastog uzorka (tj. izvijanje uslijed smičnog opterećenja) kod uzoraka debljine 1 i 2 mm. Na uzorku debljine 1 mm zabilježeni su pozitivni pomaci u smjeru osi okomite na promatranu zonu interesa u gornjem desnom i donjem lijevom kutu dok su u gornjem lijevom i donjem desnom kutu zabilježeni negativni pomaci. Iz mjerenih polja pomaka može se uočiti stvaranje dijagonalnog polukružnog žlijeba. Kod uzorka debljine 2 mm u gornjem lijevom kutu su zabilježeni negativni pomaci u smjeru osi okomite na promatranu površinu dok su u donjem desnom kutu zabilježeni pozitivni pomaci. Dijagonalno od gornjeg desnog kuta do donjeg lijevog kuta se s povećanjem opterećenja povećavaju pomaci u smjeru osi  $z$ . S povećanjem opterećenja kod uzorka debljine 3 mm na desnoj strani se povećavaju negativni pomaci po osi okomitoj na promatranu površinu, dok se u gornjem lijevom kutu povećavaju pozitivni pomaci. Pomaci u donjem lijevom kutu su približno jednaki nuli. Pri 90% smične deformacije uzorka debljine 4 mm izvan ravninski pomaci na lijevoj strani su približno jednaki nuli dok su na desnoj strani veći od 1 mm u pozitivnom smjeru osi okomite na promatranu zonu interesa. U središnjem dijelu uzorka je zabilježen pozitivan pomak od 0,75 mm. Razlika između maksimalnog pozitivnog i maksimalnog negativnog pomaka po osi okomitoj na promatranu površinu kod uzorka debljine 4 mm iznosi 1,2 mm, a kod uzorka debljine 2 mm iznosi 4,06 mm. Može se zaključiti da se s povećanjem debljine uzorka smanjuju izvan ravninski pomaci.

Povezivanjem podataka dobivenih metodom korelacije digitalne slike i podataka iz kidalice određeni su dijagrami ovisnosti smične deformacije uzorka i odgovarajućeg naprezanja. Rezultati za sva četiri uzorka zabilježavaju jako dobro preklapanje u linearnom području. Nelinearno ponašanje materijala nastaje iznad naprezanja od 100 MPa gdje je također uočeno jako dobro poklapanje krivulja. Također, prikazani su dijagrami smanjenja debljine u ovisnosti o naprezanju u karakterističnim točkama ispitnih uzoraka. Iznos stanjenja u točkama 2 i 3 je približno jednak dok se zadebljanje u točkama 1 i 4 razlikuje. Da bi se gužvanje materijala zaista vidjelo potrebno je koristiti manji mjerni objekt kako bi zona

interesa bila veća te dvorazinsku metodu korelacije digitalne slike. S obzirom na prikazane rezultate u ovom radu predlaže se izrada odgovarajućeg prihvata koji će onemogućiti nestabilnost kod tanjih ispitnih uzorka (tj. za uzorke debljine manje od 2 mm).



## LITERATURA

- [1] Čurčija, F.: Diplomski rad, Zagreb, 2017.
- [2] Janković, D.: Diplomski rad, Zagreb, 2017.
- [3] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Smicanje>
- [4] Alfirević, I.: Nauka o čvrstoći I, Tehnička knjiga Zagreb, 1995.
- [5] Lubarda, V.: Otpornost materijala, NIO, „Univerzitetaska riječ“, Titograd, 1989.
- [6] <http://www.alexstrekeisen.it/meta/fo liazioneobliqua.php>
- [7] Carlsson, L. A., Adams, D. F., Pipes, R. B.: Basic Experimental Characterization of Polymer Matrix Composite Materials, Polymer Reviews, 2013.
- [8] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941898000439>
- [9] <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1999/liu99b.pdf>
- [10] El-Hajjar, R., Haj-Alli, R.: In Plane Shear Testing of Thick Section Pultruded FRP Composites Using a Modified Arcan Fixture, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2003.
- [11] <https://www.colorado.edu/engineering/CAS/courses.d/Structures.d/IAST.Lect07.d/IAS T.Lect07.pdf>
- [12] [http://www.ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=me&chap\\_sec=02.3&page=theory](http://www.ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=me&chap_sec=02.3&page=theory)
- [13] <http://digitalimagecorrelation.org/>
- [14] Tang, Z., Liang, J., Xiao, Z., Guo, C., Large deformation measurement scheme for 3D digital image correlation method
- [15] Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software, University of South Carolina Correlated Solutions, Inc.
- [16] Zaplatić, A., Završni rad, Zagreb, 2018.