

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Antonio Milevoj

**Čisto savijanje uzoraka s izraženom mikrostrukturom koji su dobiveni 3D
printanjem**

Završni rad

Rijeka, 2020.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni preddiplomski studij
Mehanika I**

**Antonio Milevoj
JMBAG: 0114030726**

**Čisto savijanje uzoraka s izraženom mikrostrukturom koji su dobiveni 3D
printanjem**

Završni rad

Rijeka, 09.2020.

Naziv studija: **Sveučilišni preddiplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Temeljne tehničke znanosti

Znanstvena grana: Tehnička mehanika

Tema završnog rada

**ČISTO SAVIJANJE UZORAKA S IZRAŽENOM MIKROSTRUKTUROM KOJI SU
DOBIVENI 3 D PRINTANJEM
PURE BENDING OF 3D PRINTED SAMPLES WITH MICROSTRUCTURE**

Kandidat: **ANTONIO MILEVOJ**

Kolegij: **MEHANIKA 1**

Završni rad broj: **20-P-41**

Zadatak:

U uvodnom dijelu rada je potrebno provesti analizu isprintanog materijala (PLA) određujući modul elastičnosti i Poissonov koeficijent. U tu svrhu potrebno je izraditi 3D model uzorka koji će se printati na printeru Prusa I3 MK3 prema normi ISO 3167. Potom je potrebno provesti vlačno ispitivanje u kidalici Zwick 600 E u laboratoriju za konstrukcije kako bi se odredili materijalni parametri. Ispitivanje se provodi prema normi ISO 527-1 i ISO 527-2. Za istu gustoću ispune (30%), varirati smjer printanja: 1. smjer printanih vlakana se pruža u smjeru vlačne sile u kidalici, 2. smjer printanih vlakana je zarotiran za 45° u odnosu na smjer vlačne sile u kidalici. Nakon određenih materijalnih parametara, od takvog materijala potrebno je isprintati prizmu određenih dimenzija (24x12x5 cm, visina je 5cm) koja će biti podvrgnuta čistom savijanju preko tzv. "four point bending" eksperimenta. Ovo ispitivanje provesti u laboratoriju za materijale na Controls preši. U radu je potrebno provesti detaljnu eksperimentalnu analizu ponašanja 3D printanih uzoraka za slučaj čistog savijanja. Rezultate primjereno komentirati.

Tema rada je uručena: 24. veljače 2020.

Mentorica:

doc. dr. sc. Edita Papa Đukić,
dipl. ing. građ.

IZJAVA

Završni rad sam izradio samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Antonio Milevoj

U Rijeci, 14. rujna 2020.

IZJAVA

Završni/Diplomski rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta

Koncept nepomičnog pola u numeričkom modeliranju Cosseratovog kontinuuma

Voditelj projekta Gordan Jelenić

Šifra projekta HRZZ – IP – 2018 - 01 - 1732

Financijer projekta Hrvatska zaklada za znanost

Pravna nadležnost Republika hrvatska

Završni/Diplomski rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta

Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci

Voditelj projekta prof. dr. sc. Nevenka Ožanić

Šifra projekta RC.2.2.06-0001

Financijer projekta Europski fond za regionalni razvoj (EFRR)
Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH

Pravna nadležnost Republika Hrvatska

U Rijeci, 11.9.2020

Mentor:

Edita Papa Dukić

SAŽETAK

U uvodnom dijelu rada provest će se analiza isprintanih uzoraka materijala (PLA) s ciljem određivanja modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta. Uzorci će se printati pomoću printer Prusa I3 MK3 prema normi ISO 3167. Potom će se provesti vlačna ispitivanja u kitalici Zwick 600. Optičkim mjernim sustavom Aramis snimat će se površinske deformacije. Nakon što se materijalni parametri odrede, printat će se prizma istoga materijala, dimenzija (24x12x5) cm. Ispitivanje čistim savijanjem provest će se na Controls preši te će se optičkim mjerenjem detaljno analizirati deformacije i lomovi koji nastaju na prizmi.

Ključne riječi: modul elastičnosti, Poissonov koeficijent, čisto savijanje

SUMMARY

In the introductory part of the paper, the analysis of 3D printed material samples will be performed (PLA) in order to determine the modulus of elasticity and the Poisson's ratio. Samples will be printed using a printer Prusa I3 MK3 according to the norm ISO 3167. Afterwards, tensile tests will be performed on testing machine Zwick 600. Using the Aramis optical measurement system, surface deformations will be recorded. After the material parameters are determined, a prism of the same material will be 3D printed with dimensions of 24x12x5 cm. A 4-point bending test will be performed on the controls testing machine and the deformations and fractures that occur on the prism will be analyzed in detail by optical measurement.

key words: Poisson's ratio, modulus of elasticity, 4-point bending

POPIS TABLICA

Tablica 1. dimenzije uzoraka prema ISO 31670 str 21

Tablica 2. Poprečnih i uzdužnih deformacija str 35

POPIS SLIKA

Slika 1 Uzorak prizme.....	13
Slika 2 Dog bone uzorak.....	13
Slika 3 Prikaz Prusa Slicer programa.....	14
Slika 4 Prikaz faza 3D printanja	15
Slika 5 Dijagram naprezanje- deformacija	16
Slika 6 Deformacija kocke vlačnim silama	17
Slika 7 Oblik ispitnog uzorka	20
Slika 8 Prikaz strukture uzoraka	21
Slika 9 Priprema uzoraka za optičko mjerenje	22
Slika 10 Prikaz različitog nanošenja rastera ovisno o veličini mjerene površine	23
Slika 11 Dimenzije kalibriranja za leće 50 mm	24
Slika 12 .Prikaz provođenja kalibracije	25
Slika 13 Prikaz kidalice, optičkog mjernog sustava I programa koji upravlja kidalicom	25
Slika 14 Priikaz kidalice Zwick 600 E.....	27
Slika 15 Prikaz optičkog mjernog sustava	28
Slika 16 Graf sila-pomak - uzorak 9	30
Slika 17 Graf sila-pomak - uzorak 10	31
Slika 18 Uzorci 9 i 10 nakon loma.....	32
Slika 19 Graf sila-pomak - uzorak 1	33
Slika 20 Prikaz deformacije u x i y smjeru - uzorak 1	34
Slika 21 Prikaz deformacije pojedinih točaka u X i Y smjeru.....	35
Slika 22 Prikaz deformacije Y po cijeloj dužini uzorka	36
Slika 23 Prikaz deformacije u X smjeru po cijeloj dužini uzorka	37
Slika 24 Prikaz slomljenih uzoraka.....	38
Slika 25 Controls preša	42
Slika 26 Prikaz Sheme opterećenja koje se javlja na uzorku.....	43
Slika 27 Uzorak 1_0 pomak u Y smjeru	44
Slika 28 Uzorak 1_0 deformacija u x smjeru.....	45
Slika 29 Uzorak 1_45 pomak u y smjeru.....	46
Slika 30 Uzorak 1 _45 Deformacija u x smjeru.....	47
Slika 31 Uzorak 1 _45.....	48
Slika 32 Uzorak 1 _0.....	49
Slika 33 Prikaz loma uzoraka orijentacije vlakna 45 stupnjeva	50
Slika 34 Prikaz loma uzoraka orijentacije vlakna 0 stupnjeva	50

Sadržaj

SAŽETAK	6
SUMMARY	7
POPIS TABLICA	8
POPIS SLIKA	9
1. Uvod.....	11
2. Osnove 3D printanja	12
3. Materijalni parametri	16
3.1. Modul elastičnosti	16
3.2. Poissonov koeficijent	17
4. Eksperimenti	19
4.1. Vlačna ispitivanja printanih uzoraka.....	19
4.1.1. Uzorci.....	20
4.1.2. Oprema za ispitivanje i mjerenja	27
4.1.3. Rezultati vlačnih ispitivanja.....	29
4.2. For-point bending ispitivanja.....	39
4.2.1. Uzorci.....	40
4.2.2. Oprema za ispitivanje i mjerenje	42
4.2.3. Rezultati 4 point bending ispitivanja.....	44
5. Zaključak.....	53
Literatura.....	54

1. Uvod

Trodimenzijski ispis ili aditivna proizvodnja je metoda koja se odnosi na pretvorbu virtualnog 3D modela u fizički objekt. Početci 3D tehnologije datiraju početkom 1980-ih kada je Charles Hull osmislio stereolitografiju kojom se trodimenzijski objekt stvara pomoću ispisivanja uzastopnih slojeva materijala jednog na drugi. Trodimenzijski ispis započinje digitalnim modelom, obično stvorenim pomoću softvera za računalno dizajniranje (autocad), ali može uključivati i druge izvore poput CT skeniranja. Tehnologija trodimenzijskog printanja omogućuje brzu, ekonomičnu i kvalitetnu izradu prototipa, ali i gotovih proizvoda te se upravo zbog navedenog silovitom brzinom razvijala posljednjih godina. U provedenom eksperimentu 3D printer služio nam je prvenstveno za dobivanje različite mikrostrukture. Vlačnim testom ispitivali smo uzorke kako bi vidjeli određena svojstva pojedinih mikrostrukture. Vlačno ispitivanje prvenstveno služi za određivanje materijalnih parametara kao što su modul elastičnosti E , granica tečenja, vlačna čvrstoća, produljenje uzorka pri opterećenju. Paralelno s ovim eksperimentom provedeno je snimanje uzoraka pomoću optičkog mjernog sustava GOM Aramis. Optički mjerni sustav ima široku namjenu kao što je uvid u raspodjelu deformacija i polje pomaka. Primjenjuje se kod različitih metoda ispitivanja kao što su ispitivanje materijala na vlak, savijanje, smicanje, širenje rupa itd. S dobivenim materijalnim parametrima pristupamo sljedećem eksperimentu pri čemu stavljamo fokus na detaljnu analizu pukotina i uzroke nastanka odnosno analizu deformacija i naprezanja. Ispitivanja razaranjem se temelje na primjeni sile na uzorak sve dok se ne slome. Pri tome se bilježe naprezanja, maksimalna sila do loma te pomak rastojanja. Prema nekim autorima, mehanička se svojstva poput čvrstoće i krutosti mogu izračunati pomoću niza metoda. U većini slučajeva se za predviđanje svojstva savijanja materijala predlaže korištenje metoda savijanje u 3 točke i savijanje u 4 točke. Ovi testovi simuliraju vlačno i tlačno naprezanje na uzorku pri čemu se prati njegovo fizičko ponašanje. Temeljna razlika između ova dva testa je mjesto maksimalnog momenta savijanja i maksimalnih naprezanja vlakna. U ispitivanju u 4 točke maksimalno naprezanje se širi u području između mjesta nanošenja dviju sila.

2. Osnove 3D printanja

Prvi 3D printer izumljen je 1984 godine, a tijekom posljednjih desetljeća 3D printanje postalo je jedno od najbrže rastućih tehnologija. U početku je tehnologija bila veoma skupa i nedostupna no tijekom godina 3D printanje počelo je biti prisutno u svakodnevnom životu te su 3D printeri postali uobičajeni u različitim područjima industrije. Danas je vidljiv utjecaj ove tehnologije koja je omogućila velike napretke u puno segmenata ljudskog razvoja.

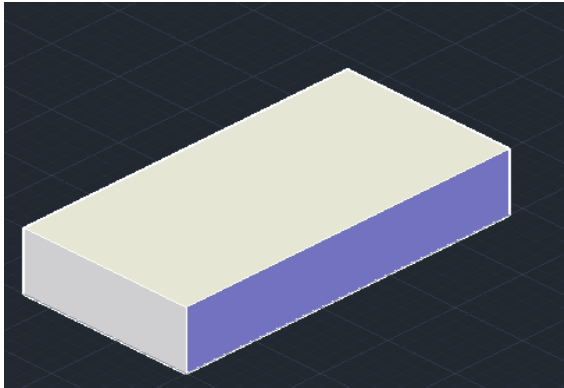
Prilikom naših eksperimenata koristit ćemo se FDM/FFF tehnologijom 3D printera. Sama kratica FDM znači tehnologija taložnog očvršćivanja, dakle radi se o tehnologiji koja spada pod aditivnu proizvodnju. Željeni fizički predmet u 3D obliku dobit ćemo nanošenjem polimernog materijala (filamenta) sloj po sloj od radne podloge prema gore.

Proizvodni proces možemo podijeliti u 3 segmenta rada:

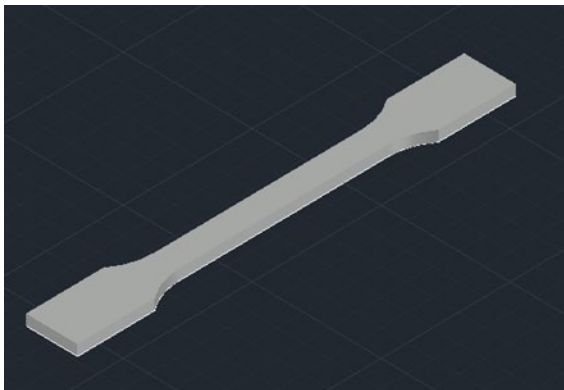
1. 3D modeliranje
2. Printanje 3D printerom
3. Završna obrada

U našoj izradi modela završnu obradu nećemo izvoditi jer promjenom površinske teksture brušenjem ili bojanjem nećemo znatno utjecati na željena svojstva isprintanih modela.

1. 3D modeliranje



Slika 1 Uzorak prizme

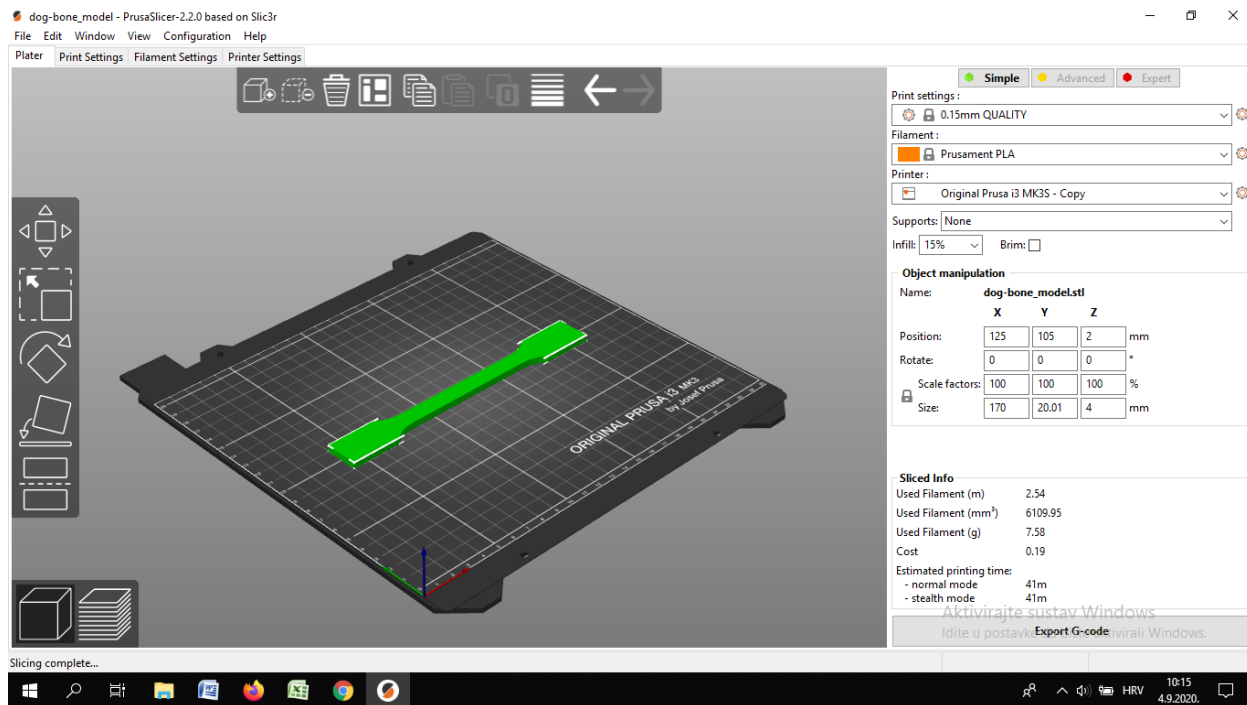


Slika 2 Dog bone uzorak

Svi uzorci modelirani su pomoću računala u programu AutoCAD. Potrebno je pripaziti da su ravnine i linije neprekinute. Ograničavajuća okolnost je što imamo minimalnu debljinu sloja pa tu treba biti oprezan oko dimenzija. Nakon uspješnog modeliranja prema normiranim dimenzijama potrebno je uzorke spremiti kao STL datoteke.

2. Printanje 3D printerom (Prusa I3 MK3)

Budući da 3D printer ne prepoznaje ništa osim numeričkog upravljanja, STL datoteku potrebno je konvertirati u G-code (programski jezik). Za konverziju koristit ćemo se programom Prusa Slicer.



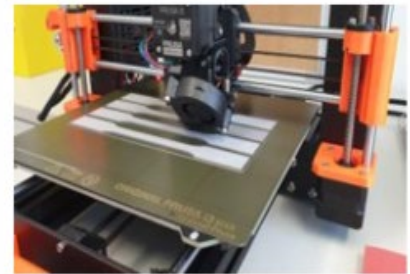
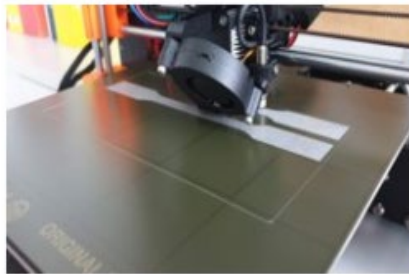
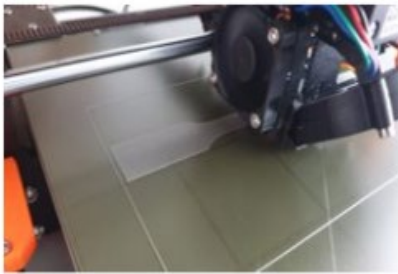
Slika 3 Prikaz Prusa Slicer programa

Prusa Slicer ne služi samo za konverziju, već se pomoću njega može upravljati postavkama 3D printera. Najvažniji parametri koje moramo definirati su temperatura ispisa, visina sloja, brzina ispisa te količina i oblik ispune.

Materijal (filament) kojeg smo koristili bio je PLA. On zahtijeva sljedeće parametre; temperatura za 3D ispis (hot end) 190°C - 210°C, temperatura radne površine 20°C - 60°C, jačina ventilatora 20-50%, brzina ispisa 40 – 100 mm/s. U ovim eksperimentima najbitniji parametri koji će utjecati na materijalna svojstva su orijentacija samog uzorka, kutevi pod kojim će se slojevi printati te postotak ispunjenosti uzorka.

Nakon što su svi parametri zadani te je konverzija u G-code napravljena još je potrebno G-code prebaciti na SD karticu koju ubacujemo u Prusa I3 MK3 printer. Sada možemo započeti sa procesom printanja.

Proizvodni proces 3D printanja započinje stavljanjem PLA filamenta u glavu 3D printera koji je namotan na kolut. Zagrijana glava 3D printera topi filament do određene viskoznosti. Tako otopljen PLA filament izađe iz mlaznice glave po točno određenom putu i parametrima koje smo prije definirali. Sloj plastike se hladi i skrućuje što omogućuje nanošenje sljedećeg sloja. Taj se proces ponavlja dok se kompletan model ne izradi.



Slika 4 Prikaz faza 3D printanja

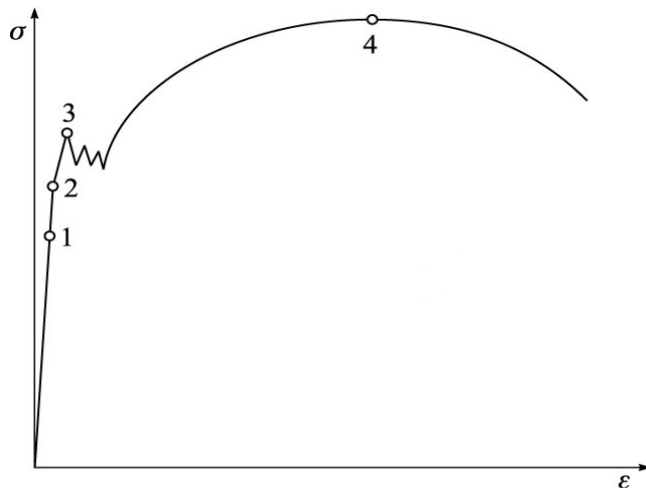
3. Materijalni parametri

3.1. Modul elastičnosti

Definiran je linearnim dijelom krivulje naprezanje-deformacija te se može izraziti pomoću omjera:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{(F/A)}{(\Delta L/L)}$$

Konstanta E naziva se modul elastičnosti. Kada bi se na šipke istoga presjeka ali različitog materijala oslonjene krajevima na jednako razmaknutim osloncima objesio uteg, one bi se različito elastično savile. Što znači da bi njihova razina savijanja ovisila o materijalu odnosno o njegovom modulu elastičnosti. Materijali visokog modula elastičnosti imaju vrlo jake atomske veze (primjerice dijamant). Ukoliko su materijali izgrađeni od nepovezanog skeleta lanca molekula, modul elastičnosti biti će vrlo nizak npr.(guma).



Slika 5 Dijagram naprezanje- deformacija

Na Slici 5 prikazan je karakterističan radni dijagram jednog od uobičajenih građevinskih materijala – čelika, koji se dobiva vlačnim ispitivanjem. Na njemu uočavamo bitne točke (od 1 do 4) koje definiraju određeno ponašanje materijala. Točka 1 predstavlja granicu proporcionalnosti, točka 2

granicu elastičnosti, točka 3 granicu tečenja, a točka 4 vlačnu čvrstoću. Ovisno o tome koji materijal ispitujemo, nećemo uvijek imati isto ponašanje prilikom vlačnog testa.

Prikaz ove slike nam omogućuje uočavanje Hookovog pravca, on nam prikazuje linearan odnos naprezanja i deformacije odnosno elastično područje. Što je kut između osi apcisa i hookovog pravca veći biti će i modul elastičnosti veći. Dakle uz veliki kut imamo veliki modul elastičnosti što pokazuje da se materijal uz velika naprezanja malo deformira.

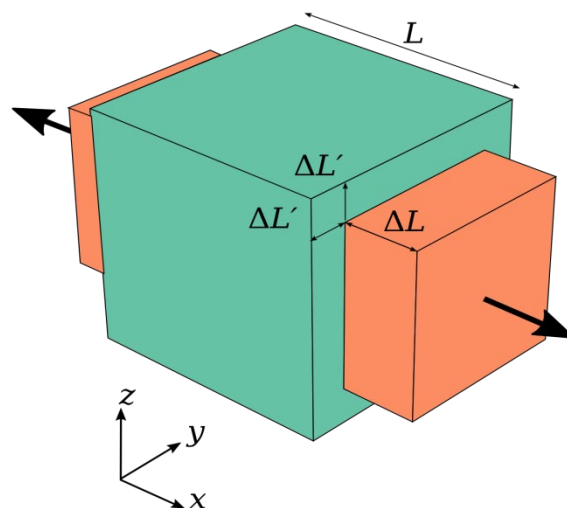
Modul elastičnosti nam prikazuje opiranje materijala elastičnoj deformaciji. Kako naprezanje raste modul elastičnosti više nije konstantan, materijal iz elastičnog područja prelazi u plastično gdje nastupa trajna deformacija ili lom.

3.2. Poissonov koeficijent

Kada kocka ima duljine stranica L , te je napregnuta na vlak u smjeru osi x , ona se produlji za vrijednost ΔL , a u smjeru drugih dviju osi materijal se suzi ili skupi za pola duljine ΔL .

Poissonov koeficijent nam pokazuje odnos između poprečnih i uzdužnih deformacija. Mi ćemo ga odrediti prilikom vlačnog ispitivanja na kidalici.

$$\nu = -\text{poprečna deformacija} / \text{uzdužna deformacija}$$



Slika 6 Deformacija kocke vlačnim silama

Vrijednosti Poissonovog koeficijenta ovise o materijalu i kreću se između vrijednosti 0 i 0,5. Kada je vrijednost poissonovog koeficijenta $\nu=0,5$ volumen tijela tijekom opterećenja ostaje isti.

4. Eksperimenti

4.1. Vlačna ispitivanja printanih uzoraka

Vlačno ispitivanje prvenstveno služi za određivanje materijalnih parametara kao što su modul elastičnosti E , granica tečenja, vlačna čvrstoća, produljenje uzorka pri opterećenju. U ovom eksperimentu bazirat ćemo se na određivanju modula elastičnosti i proračunu poissonovog koeficijenta.

Za ispitivanje uzoraka koristit će se kidalica Zwick 600 i optički mjerni sustav GOM Aramis. Standardizirani uzorak opterećivat će se pomoću kidalice Zwick 600 uz beskontaktno praćenje površinskih deformacija optičkim mjernim sustavom.

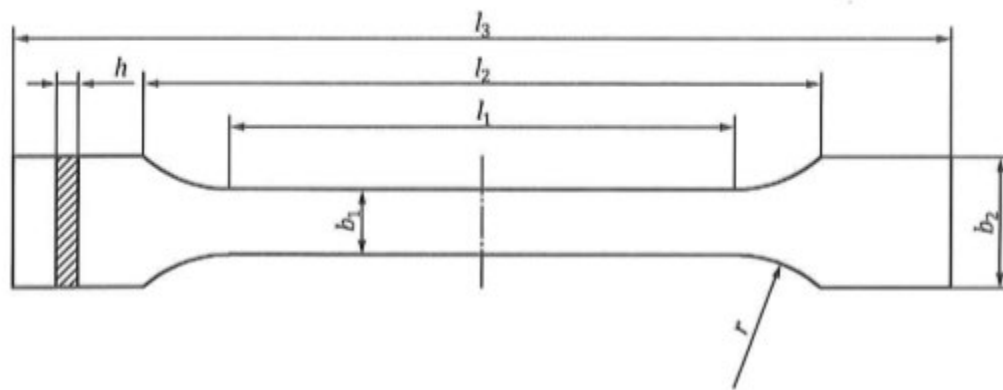
Uspjeh svakog eksperimenta pa tako i ovog moguć je jedino uz dobar plan. Ovaj je eksperiment isplaniran postepeno tako da je podijeljen u 3 faze rada. U prvu fazu rada spada priprema uzoraka. U drugu fazu priprema optičkog mjernog sustava, a treća faza obuhvaća mjerenje i provedbu eksperimenata.

4.1.1.Uzorci

Kako bi se dobiveni rezultati materijalnih parametara mogli međusobno uspoređivati potrebno je ispitivanje provoditi prema važećim standardima.

Za ovu izradu modela koristio se internacionalni standard ISO 3167 koji preporučuje usvajanje određenih dimenzija te samog oblika modela.

ISO 3167:2014(E)



Slika 7 Oblik ispitnog uzorka

Oznake		Preporučene vrijednosti i odstupanja (mm)	Usvojene vrijednosti (mm)
l3	ukupna duljina	≥ 150	170
l1	dužina uskog paralelnog dijela	80 ± 2	80
r	radijus	od 20 do 25	24
l2	udaljenost između širokih paralelnih dijelova	od 104 do 113	110
b2	širina na krajevima	$20 \pm 0,2$	20
b1	širina uskog dijela	$10 \pm 0,2$	10
h	debljina	$4 \pm 0,2$	4

Tablica 1. dimenzije uzoraka prema ISO 31670

Kod pojedinih vrsta materijala preporučuje se da ukupna duljina uzorka bude veća kako bi se izbjeglo klizanje i pucanje uzoraka u čeljusti kidalice. Pri odabiru manjeg radijusa zakrivljenost je veća, površina također što znači da će naprezanja koja se nalaze na prijelazima između uskog

paralelnog i zaobljenog dijela biti manja. To pogoduje našim ispitivanjima jer će se plastična nestabilnost (mjesto puknuća) desiti na mjestu gdje je površina poprečnog presjeka uzoraka manja. Time ćemo izbijeći pucanje na samom prihvatu uzoraka i čeljusti kicalice.

Za ovaj eksperiment odabrane su dvije vrste uzoraka koje su se prethodno isprintale pomoću 3D printera. Ti se uzorci ne razlikuju po obliku nego po strukturi odnosno njihovoj ispunjenosti i smjeru printanja. . Uzorke smo, iz nekih drugih razloga, označili sa brojevima 9 i 10 te će oni tako i ovdje biti označeni.



Slika 8 Prikaz strukture uzoraka

Uzorak 9

- ispunjenost 30%
- smjer printanja orijentiran pod 0°

Uzorak 10

- ispunjenost 30%

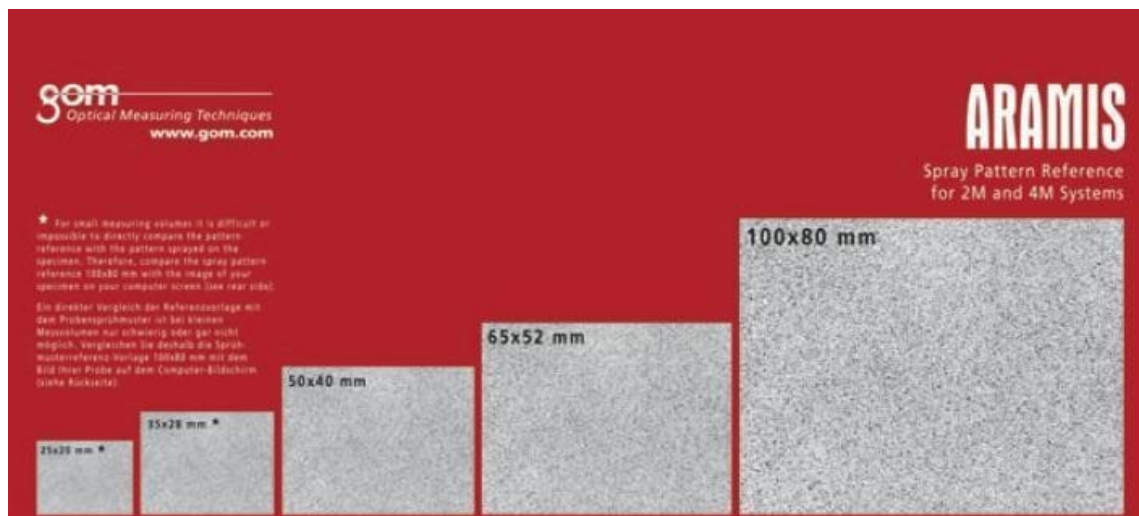
-smjer printanja orijentiran pod 45°

Od svake vrste uzorka napravljena su po 4 uzorka radi statističke obrade.

Priprema uzoraka započinje nanošenjem rastera na površinu uzorka koja je okrenuta prema kameri. Najprije se nanosi tanki sloj bijeloga spreja u više navrata kao pozadinska boja. Nakon nje crnim se sprejem nanose točkice po istoj površini za postizanje efekta kojeg kamere mogu prepoznati. Ovisno o veličini mjerene površine imamo različite upute za nanošenje rastera.



Slika 9 Priprema uzoraka za optičko mjerenje



Slika 10 Prikaz različitog nanošenja rastera ovisno o veličini mjerene površine

Priprema optičkog mjernog sustava

Pod pripremom optičkog mjernog sustava podrazumijevamo kalibraciju kamera. Kalibracija kamere provodi se prema uputama i preporučenim parametrima iz GOM priručnika. Kamere kalibriramo prema veličini mjernog volumena i promjeru leća s kojima raspolažemo. U ovom slučaju korištene su leće promjera 50 mm. Kalibracijski objekt mora biti paralelan s optičkim

mjernim

sustavom.

Page 14 (14)

50 mm Lens (ARAMIS 4M)

Sensor Configuration Examples for ARAMIS 4M (2358x1728 Pixels)

2.4 50 mm Lens (ARAMIS 4M)

Sensor	Lens	Measuring Volume (mm³)	Comments	Measuring Distance (mm)	Measuring Angle (°)	Camera Type	Aperture dependent depth of field (mm)
							5.6 7.1 8.0 9.0 10.0 11.0 12.5 16.0 20.0 25.0
25 x 18	---	100	25	228	40	CCD 23k18	n.a. n.a. n.a. n.a. n.a. 2.1
30 x 20	---	100	12.5	280	30	CCCP20 30x24	n.a. n.a. n.a. 0.1 4 11
50 x 37	---	500	15.5	295	302	CCCP20 30x24	n.a. n.a. n.a. 1 5.6 13
69 x 48	---	500	345	124	25	CCCP20 30x44	n.a. n.a. n.a. 5 12 25
80 x 60	---	500	395	140	25	CCCP20 30x44	n.a. n.a. 2 11 21 39
100 x 75	---	500	465	178	25	CP20 90x72	n.a. n.a. 1.8 21 37 65
125 x 90	---	500	555	210	25	CP20 90x72	n.a. 5.2 19 38 64 110
150 x 110	---	500	645	258	25	CP20 90x72	n.a. 11 32 61 91 110
175 x 130	---	500	735	294	25	CP20 175x140	4.9 24 49 81 146 175
200 x 150	---	500	820	334	25	CP20 175x140	12 17 69 120 180 209
250 x 180	---	800	1060	416	25	CP20 250x200	32 37 101 200 250 259
300 x 220	---	800	1180	490	25	CP20 250x200	59 110 190 299 300 309
350 x 260	---	800	1360	574	25	CP20 250x200	92 170 270 350 350 359
400 x 290	---	800	1540	654	25	CP20 250x200	130 230 360 440 440 449
500 x 370	---	800	1910	680	21	CP20 250x200	250 430 500 500 500 509
750 x 550	25	1250	2800	---	24	CC20 100x160	620 750 750 750 750 750
1000 x 730	25	1600	3660	---	25	CC20 100x160	1000 1000 1000 1000 1000 1000
1250 x 920	25	1600	4590	---	20	CC20 160x120	1250 1250 1250 1250 1250 1250

Legend

1) without laser pointer

2) For further information please refer to the user information (Hardware for ARAMIS (Fixed focus))

MS Slider distance at Mech. Step

n.a. Lens cannot be adjusted to the aperture value.

n.a. It is not possible to focus the complete measuring volume. Resolution limited by aperture.

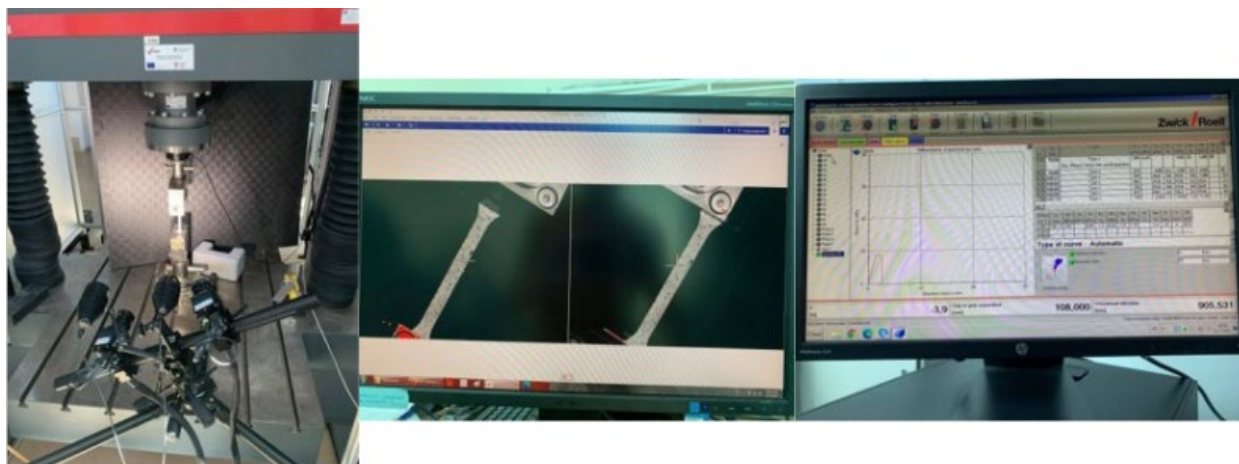
Slika 11 Dimenzije kalibriranja za leće 50 mm

Veličina ispitnog uzorka nam definira mjerni volumen koji je dimenzija 150x110 mm. Kamere međusobno moraju biti udaljene 258 mm. Kalibracijski objekt od optičkog mjernog sustava mora biti udaljen 645 (±55)mm. Kut kamera mora biti tako postavljen da na korisničkom sučelju imamo identičan prikaz slika kalibracijskog objekta lijeve i desne kamere. Nadalje kalibracijski se objekt mora okretati po uputama koje nam program zadaje te u svakom položaju snimiti. Kada je kalibracija objekta jednom uspješno napravljena nju nije potrebno više radit već ju je dovoljno samo pohraniti u memoriju.



Slika 12 .Prikaz provođenja kalibracije

Nakon što se raster na uzorku osušio uzorak se postavlja okomito u čeljusti kidalice Zwick 600 E. Čeljusti kidalice se pritežu kako bi se izbjeglo proklizavanje. Radi toga se na uzorku javljaju tlačna naprezanja koja se otklanjaju malim pomicanjem čeljusti. Preko korisničkog sučelja mjernog sustava GOM Armis korigiramo razinu osvjetljenja, oštrinu slike koja se podešava na kamerama te se otklanjaju refleksije svjetlosti koje smetaju procesu mjerenja.



Slika 13 Prikaz kidalice, optičkog mjernog sustava i programa koji upravlja kidalicom

Nakon podešavanja sve mjerne opreme slijedi provedba eksperimenta. Eksperiment provodimo nanošenjem vlačnog opterećenja na uzorak brzinom od 10 N/s i sve do pucanja uzorka. Kidalicom se upravlja preko računala odnosno programa ZwickRoell. Optički mjerni sustav pokrećemo, stoga trebamo znati okvirno vrijeme trajanja pokusa kako bi se oba sustava vremenski uskladila i tako stigla snimiti sve segmente deformacija. Ovaj postupak ponavljamo 4 puta za svaki uzorak radi statističke obrade.

4.1.2. Oprema za ispitivanje i mjerenja

Kidalica Zwick 600E

Vlačna ispitivanja na uzorcima provodila su se na kidalici Zwick 600E. Ovaj model kidalice sastoji se od dva radna prostora. Donji radni prostor služi za ispitivanja na savijanje i tlačna ispitivanja, a gornji je namijenjen ispitivanjima na vlak. Mehaničke čeljusti služile su za prihvatanje uzorka ali ova kidalica ima još mogućnost korištenja pneumatskih i hidrauličkih čeljusti.



Slika 14 Priikaz kidalice Zwick 600 E

ARAMIS optički mjerni sustav

Temeljni zadatak optičkog mjernog sustava aramis je detaljno snimiti promjene dimenzija mjerenog objekta. Mjereni objekti mogu biti raznih vrsta npr.(gume, drva , kompozita, metala itd.). Mjerni se sustav sastoji od dva mala reflektora koja služe za osvjetljenje mjernog objekta, dvije kamere kod kojih možemo regulirati kut snimanja, podesivog stalka i računalnog programa aramis koji služi za obradu slika.



Slika 15 Prikaz optičkog mjernog sustava

Najveća prednost ovakvog mjerenja je ta što Aramis može svakom pikselu zadati koordinate. Time vrlo detaljno obuhvaća analizirajuće područje preko kojeg daje uvid u raspodjelu deformacija i polje pomaka. Primjenjuje se kod različitih metoda ispitivanja kao što su ispitivanje materijala na vlak, savijanje, smicanje, širenje rupa itd.

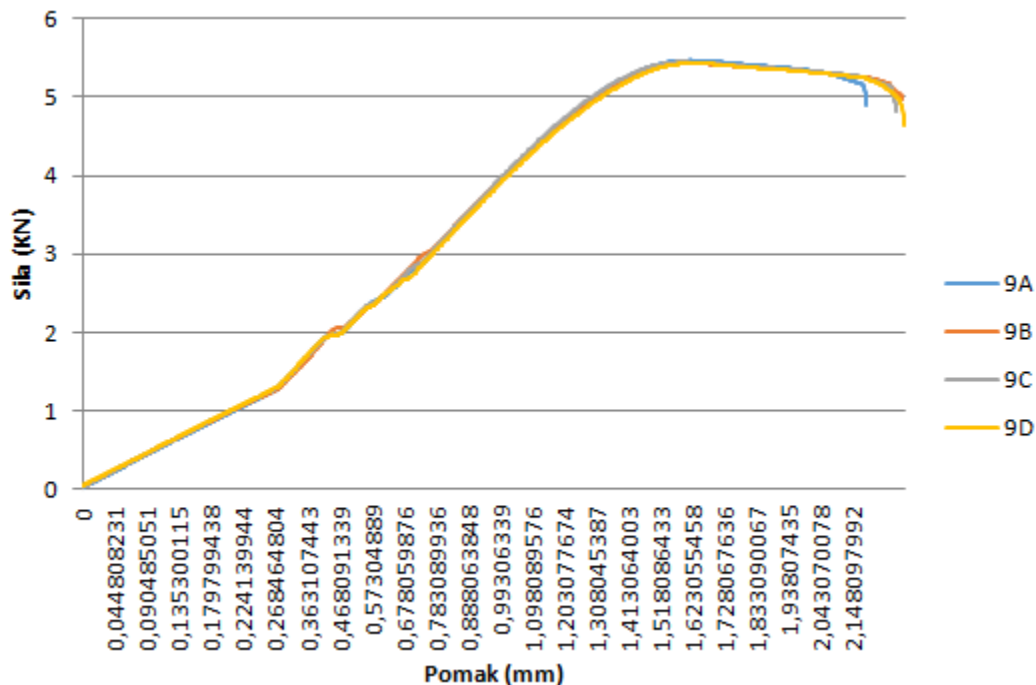
Pomoću optičkog mjernog sustava možemo analizirati:

- Toplinske deformacije
- Deformacije kod zavarenih materijala
- Širenje pukotina

- Ponašanje spojenih dijelova
- Svojstva materijala pri visokim i niskim temperaturama

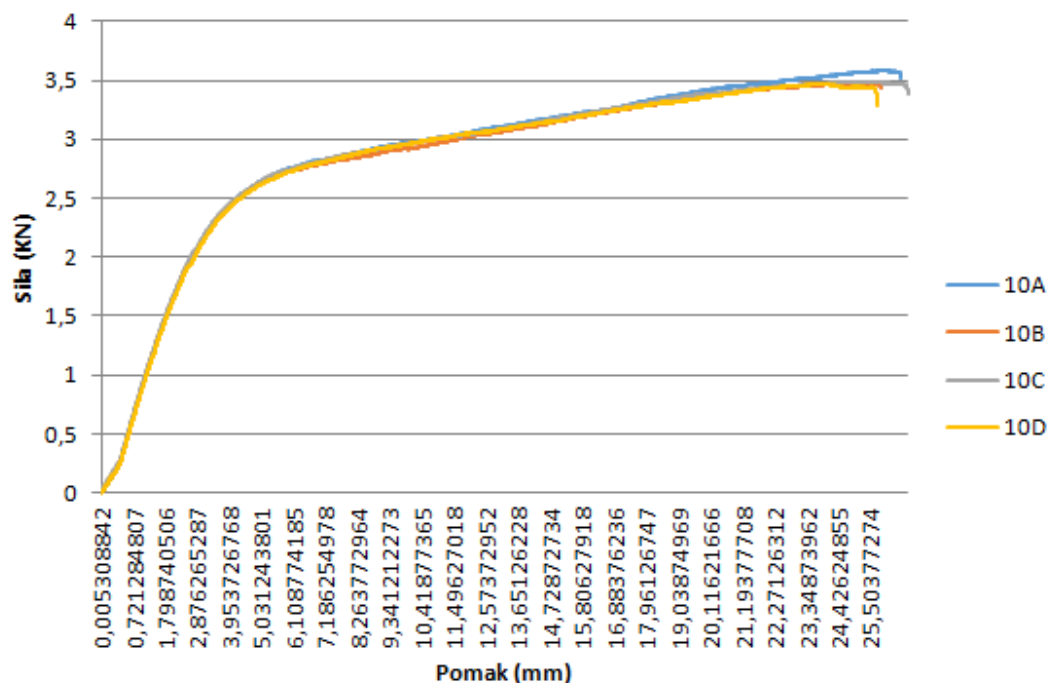
4.1.3.Rezultati vlačnih ispitivanja

Nakon provedbe vlačnih ispitivanja potrebno je obraditi rezultate u programu Excel i Aramis. Pri obradi rezultata u sustavu Aramis naišli smo na probleme kod određivanja poissonovog koeficijenta. Dobivanjem vrlo malih vrijednosti poissonovog koeficijenta zaključili smo da optički mjerni sustav nailazi na probleme kad površina uzorka nije u potpunosti ispunjena. Već prilikom nanošenja rastera na uzorak ispunjenosti od 30% može se primijetiti da je vidljivost faseta vrlo mala, te da je puno kvalitetnija kod potpuno ispunjenog uzorka. Deformacije kod vlačnih ispitivanja još više smanjuju tu vidljivost. U nastavku prikazat će se razlika između modula elastičnosti uzoraka 9 i 10 te vrijednosti poissonovog koeficijenta i modula elastičnosti kod potpuno ispunjenog uzorka, kojeg smo označili brojem 1.



Slika 16 Graf sila-pomak - uzorak 9

Kako bi dobili željeni graf i izbjegli poremećaje radi pre naglog nanošenja sile do točke 1, računalni sustav polako povećava i ubrzava s nanošenjem sile. Zbog toga graf počinjemo promatrati od točke 1 nadalje. Prvo što se može uočiti je linija koja je kod svih 4 uzoraka gotovo jednaka što ukazuje da uzorci nemaju nikakvu grešku te da je ispitivanje dobro sprovedeno. Na grafu vrlo je jasno izražen linearan odnos sile i pomaka pomoću kojeg se dobiva modul elastičnosti. Gornja i donja granica tečenja nije izražena kao kod nekih drugih materijala, ali svejedno se može vidjeti prijelaz iz elastičnog u plastično područje. Nakon dostizanja vlačne čvrstoće produljenje raste uz smanjenje sile sve do krajnje točke u kojoj dolazi do loma. Usvojeni modul elastičnosti za uzorak 9 iznosi $E = 494.83 \text{ MPa}$, a dobiven je kao srednja vrijednost 4 ispitanih uzoraka.



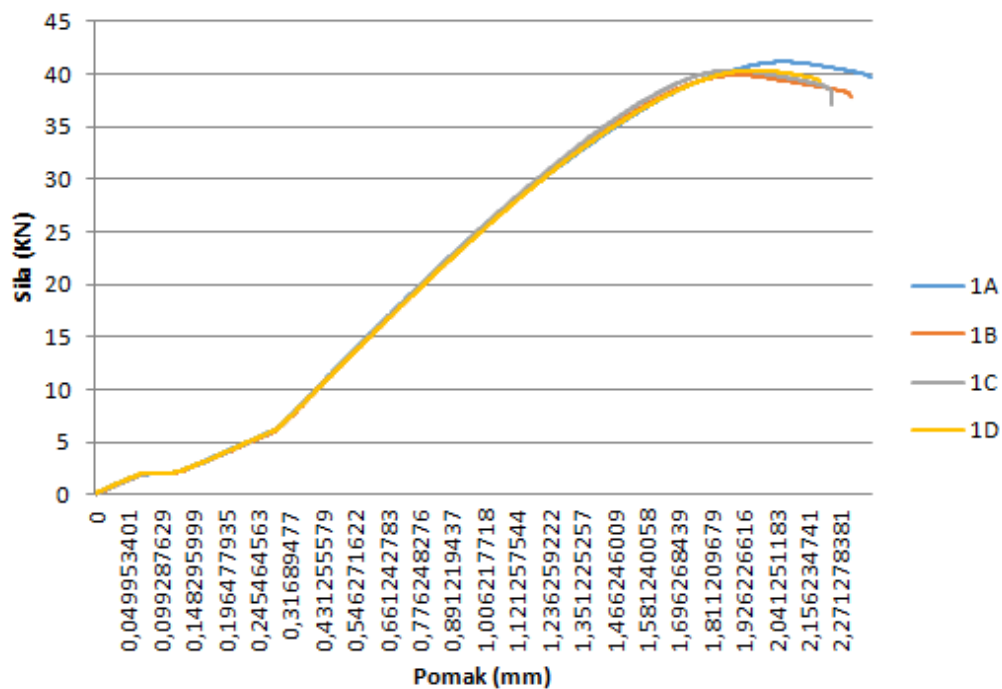
Slika 17 Graf sila-pomak - uzorak 10

Sva 4 uzoraka imaju gotovo istu krivulju. Linearnost između sile i pomaka također je lijepo izražena, no ona je puno manja nego na prijašnjem grafu. Nastupa kontinuirani prijelaz iz elastičnog u elastoplastično područje. Vidi se da je uzorak pretrpio znatne plastične deformacije stoga može ga se svrstati u duktilne materijale. Plastične su deformacije ravnomjerne. Iznosi produljenja puno su veći, a i vrijeme trajanja pokusa bilo je znatno duže nego kod uzoraka broja 9. Modul elastičnosti iznosi $E = 99,53 \text{ MPa}$



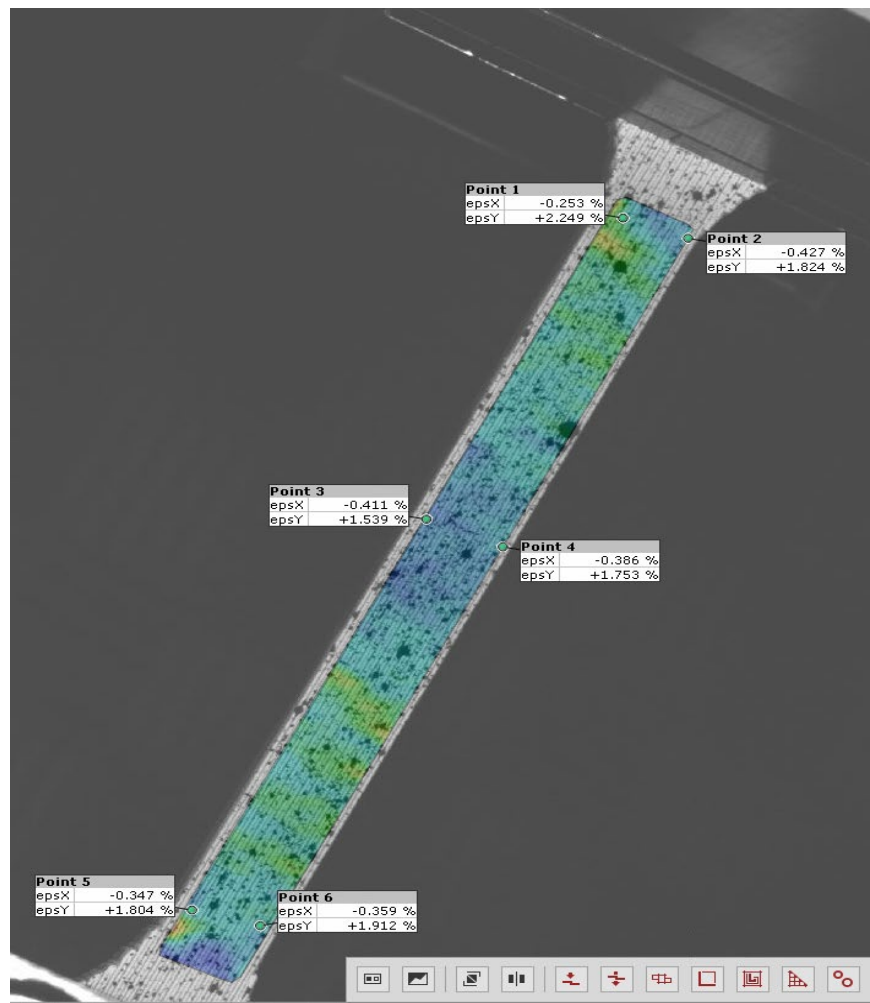
Slika 18 Uzorci 9 i 10 nakon loma

Uzorci 9 i 10 nakon loma razlikuju se po uzdužnim i poprečnim dimenzijama, a i po obliku sloma koji je nastupio. Uzorak 10 puno se više produžio u uzdužnom smjeru, a u poprečnom suzio što se poklapa sa prijašnjim rezultatima koje smo prikazali na grafu. Ispunjenost kod oba uzorka je 30% međutim smjer printanja je drukčiji što je očigledno utjecalo na oblik sloma. Kod uzoraka broja 9 lom je nastupio u vlaknima koja su paralelna vlačnom opterećenju. Smjer printanja uzoraka broja 10 bio je 45 stupnjeva točno u tom smjeru desio se lom.



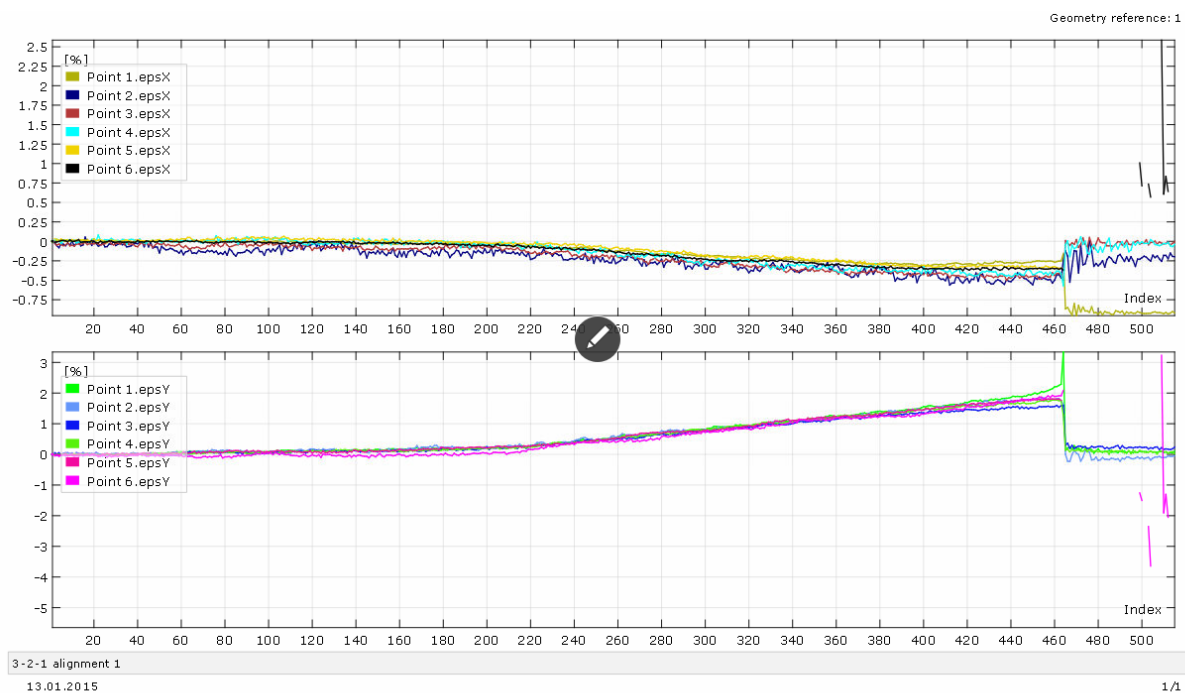
Slika 19 Graf sila-pomak - uzorak 1

Graf uzoraka broja 1 promatrat ćemo također od mjesta 1 kao i kod prijašnjih uzoraka radi istog razloga. Pomoću linearnog dijela između sile i pomaka određuje se modul elastičnosti koji iznosi $E = 2302.84 \text{ MPa}$. Modul elastičnosti puno je veći za razliku od prijašnjih uzoraka. Razlog tome su vrlo mala produljenja u odnosu na veličinu sile koja se nanosi. Graf nam pokazuje da plastičnih deformacija gotovo ni nema, te da lom nastupa iznenada.



Slika 20 Prikaz deformacije u x i y smjeru - uzorak 1

Obradom slika u sustavu aramis pokušat će se što točnije odrediti poissonov koeficijent. Za ovih 6 odabranih točaka određuju se deformacije u x (poprečnom) i y (uzdužnom smjeru). Pomicanjem broja slika možemo točno odrediti područje gdje će nastupiti lom. Puknuće nastaje u području točaka 5 i 6. Grafičkim prikazom deformacija u vremenu uočava se da se svih 6 točaka gotovo jednako deformiraju, što jasno pokazuje slika br. 21.

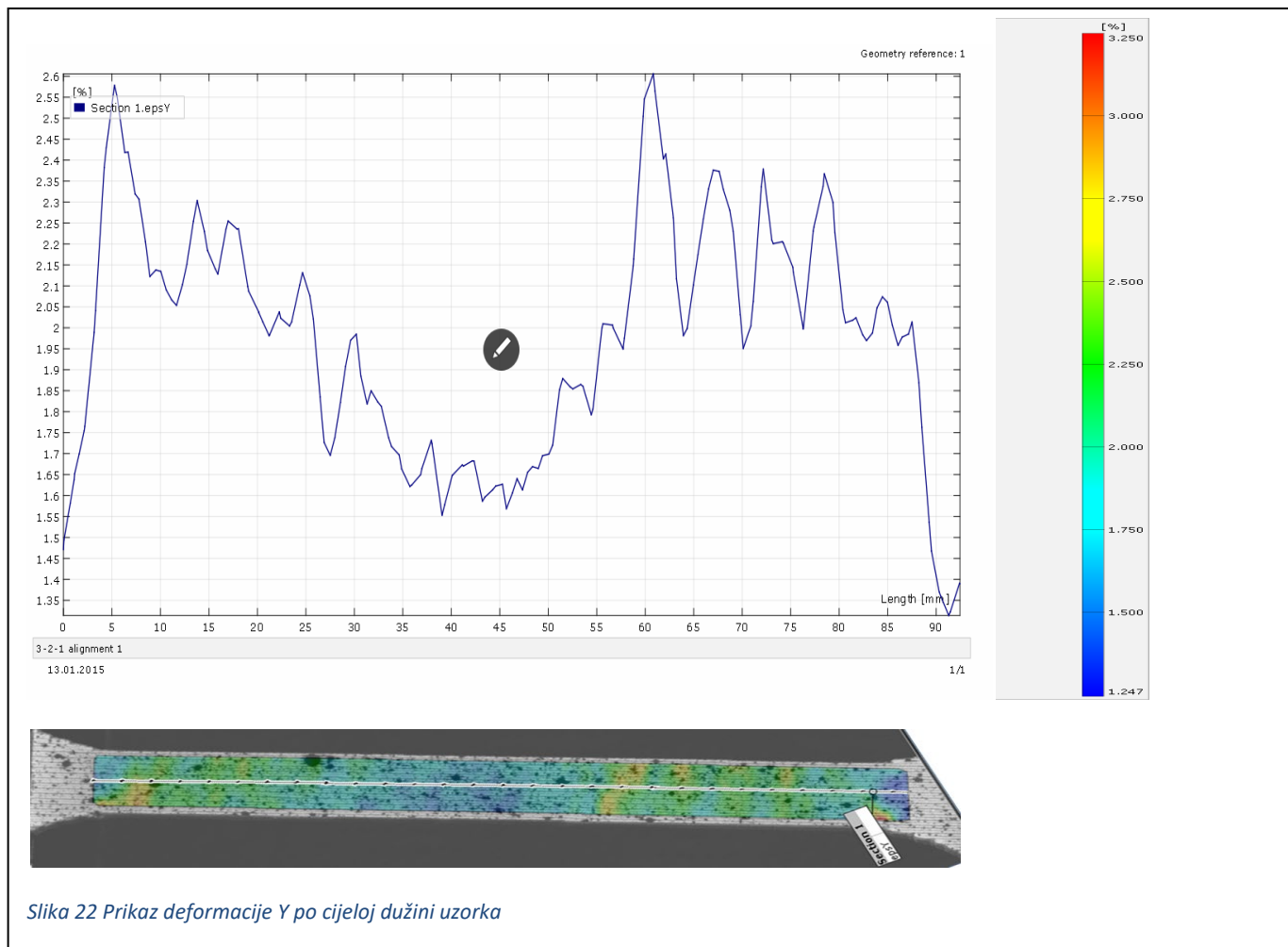


Slika 21 Prikaz deformacije pojedinih točaka u X i Y smjeru

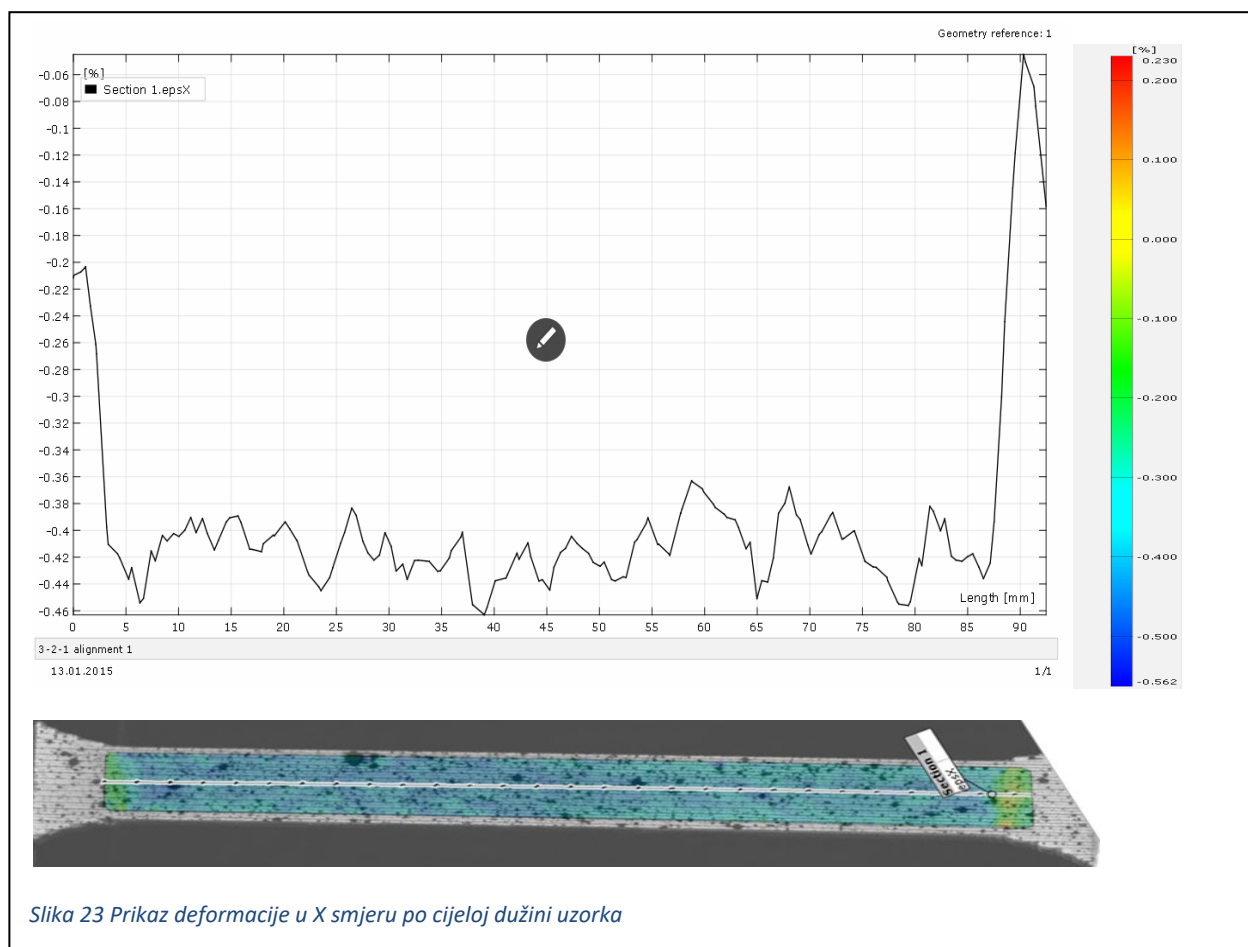
Točke	ϵ_x (%)	ϵ_y (%)
P1	-0,253	2,249
P2	-0,427	1,824
P3	-0,411	1,539
P4	-0,386	1,753
P5	-0,347	1,804
P6	-0,359	1,912

Tablica 2. Poprečnih i uzdužnih deformacija

Za poissonov koeficijent uzela se max vrijednost deformacije u x smjeru i y smjeru te on iznosi $\nu=0,19$



Plavom bojom označena su područja na uzorku koja su se deformirala u ϵ_y (uzdužnom) smjeru do 2% , prelaskom prema crvenoj boji povećavaju se deformacije. Graf prikazuje odnos između uzdužne deformacije i duljine uzorka. Vidi se sukladnost između promjena boja i skokova u grafu. Mjesto loma može se očekivati na gornjim ekstremima grafa.



Prikazuje se odnos između ϵ_x (poprečnih) deformacija duž cijeloga uzorka. Deformacije su negativne što znači da se uzorak suzuje prilikom povećavanja opterećenja. Iznos deformacija po cijeloj duljini uzorka je gotovo isti.



Slika 24 Prikaz slomljenih uzoraka

Lom nastupa bez vidljivih plastičnih deformacija. Može se reći kako je kod ovih uzoraka nastupio kruti lom. Ako usporedimo sliku br.22 i sliku br.24 te promatramo mjesto loma vidimo koncentraciju deformacija na mjestu gdje je došlo do loma.

4.2. 4-point bending ispitivanja

Ispitivanja savijanjem obično se provode da se odredi duktilnost ili otpornost navedenog materijala na lom. Pomoću ovog ispitivanja probat će se utvrditi kako se ponašaju različite strukture uzorka prilikom čistog savijanja odnosno različiti materijalni parametri koje smo u vlačnom testu definirali. Razmatrat će se koncentracija naprezanja i deformacija ovisno o strukturi uzoraka. Uspoređivat će se nastali lomovi te će se probati naći povezanost između teorije i provedenih eksperimenata.

Ispitivanja će se provoditi na Controls preši te promatrati pomoću optičkog mjernog sustava Aramis. Kao i u prijašnjem slučaju eksperiment će se provesti u nekoliko segmenata rada. Prva faza obuhvaća pripremu uzoraka, druga faza pripremu optičkog mjernog sustava, a u trećoj fazi provest će se mjerenje.

4.2.1.Uzorci

Za ovaj eksperiment odabrane su dvije vrste uzoraka koje su prethodno isprintane pomoću 3D printera. Ti se uzorci ne razlikuju po obliku nego po strukturi odnosno njihovoj ispunjenosti i smjeru printanja, oni su po strukturi sukladni uzorcima 9 i 10. Uzorci su oblika prizme i dimenzija 24x12x5 cm.

Uzorak 1_0°

- ispunjenost 30%
- smjer printanja orijentiran pod 0°
- modul elastičnosti $E = 494.83 \text{ MPa}$

Uzorak 1_45°

- ispunjenost 30%
- smjer printanja orijentiran pod 45°
- modul elastičnosti $E = 99,53 \text{ MPa}$

Od svake vrste uzorka napravljena su po 3 uzorka kako bi se dobiveni rezultati usporedili .

Postupak provedbe pripreme uzoraka i optičkog mjernog sustav jednak je kao i u eksperimentu vlačnog ispitivanja stoga će se napisati samo hodogram rada te pripadajući podaci koje smo koristili.

1. Priprema uzoraka

- prilagodilo se nanošenje rastera ovisno o dimenzijama prizme

2. Priprema optičkog mjernog sustava

- Kalibracija kamere:

- Leće 50 mm

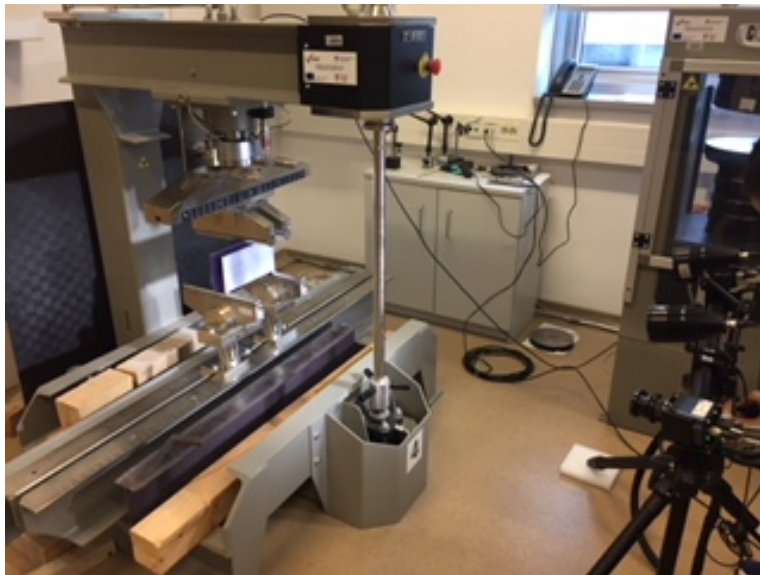
- Mjerni volumen 350x260 mm
- Udaljenost mjernog objekta od kamera 1360 (± 130) mm
- Udaljenost između kamera 574 mm
- Kut snimanja 25°

Nakon provedbe nanošenja rastera i provedbe kalibracije uzorak se može postaviti na Controls prešu. Nastavak eksperimenta ,postavljanje uzorka i utjecaj savijanja ćemo objasniti u sljedećem poglavlju (4.2.2).

4.2.2. Oprema za ispitivanje i mjerenje

Controls preša

Služi za ispitivanje čvrstoće na savijanje. Sastoji se od 3 ili 4 oslonaca valjkastog oblika ovisno o eksperimentu koji se provodi. Prilikom ovog eksperimenta koristila su se 4 oslonca jer se željelo dobiti polje čistog savijanja. Dva donja oslonca služe za postavljanje uzorka i ona su pomična tako da se mogu ispitivati uzorci različitih dimenzija. Preko gornjih oslonaca nanose se sile. Valjkastog su oblika da se dobije djelovanje sile točno u jednoj točki. Gornji oslonci također su pomični kako bi se mogao mijenjati moment bez promjene sile.



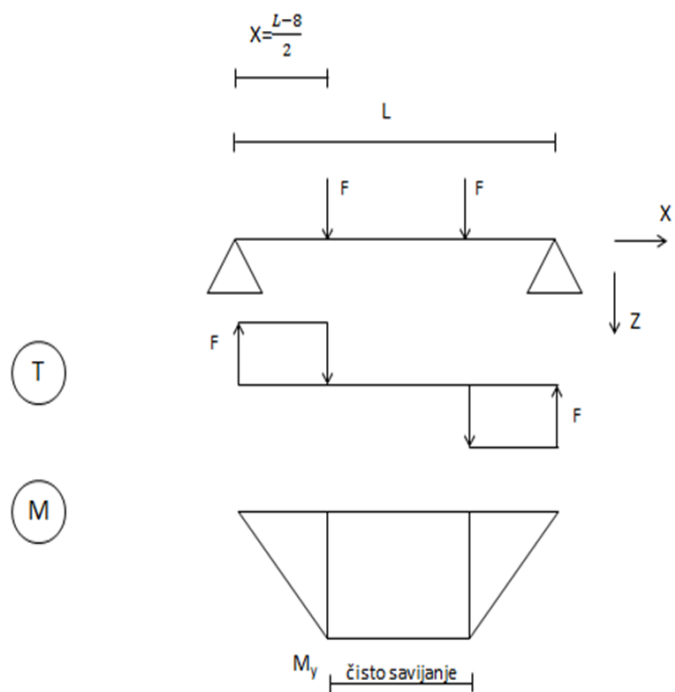
Slika 25 Controls preša

Raspon između oslonca iznosi 22 cm, a duljina uzorka iznosi 24 cm. Kako ne bi došlo do klizanja uzorka, on se mora postaviti simetrično na oslonac na način da su mu krajnje točke udaljene 1 cm od oslonaca. Controls prešom se upravlja preko računalnog programa u kojeg se unosi brzina opterećenja u ovom slučaju ona iznosi 30 N/s. Uzorak se opterećuje do pojave loma.

Razmak između sila F koje nanosimo na uzorak jednak je 8 cm.

$L = 22$ cm

$X = 7$ cm



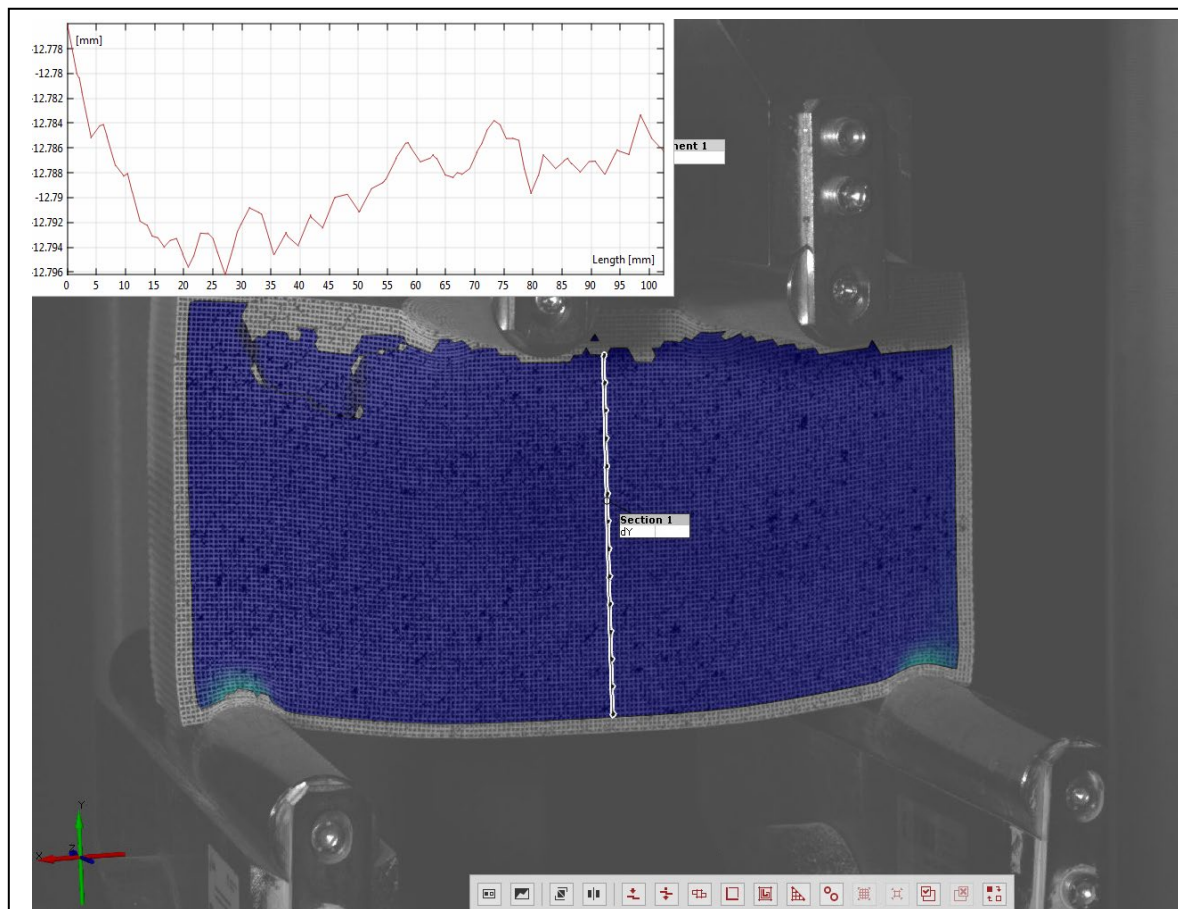
Slika 26 Prikaz Sheme opterećenja koje se javlja na uzorku

ARAMIS optički mjerni sustav

Optički mjerni sustav ima istu funkciju kao i kod vlačnog ispitivanja. Prije početka snimanja okvirno određujemo trajanje pokusa. Kod uzoraka koji imaju smjer vlakana pod 45° postavljamo brzinu slikanja 3Hz što bi značilo 3 slike u sekundi, a kod uzoraka koji imaju smjer vlakana pod 0° 5 Hz. Razlog tome je što očekujemo brži lom kod ovih drugih uzoraka.

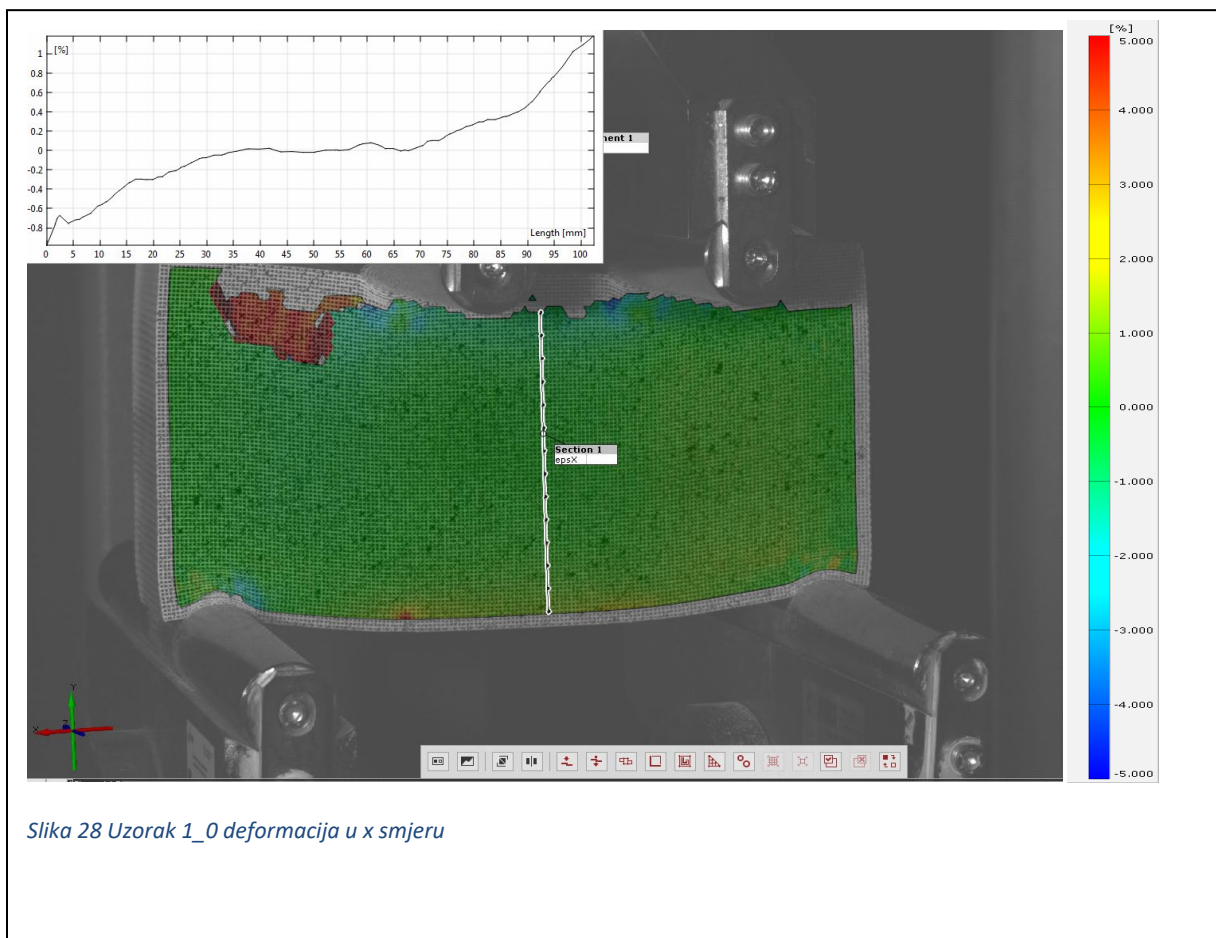
4.2.3.Rezultati 4 point bending ispitivanja

Nakon provedenih ispitivanja dobiveni rezultati obradit će se u programima excel i aramis. Za orijentaciju i lakše razumijevanje u donjem lijevom kutu svake slike obrađene u sustavu aramis prikazane su koordinatne osi.



Slika 27 Uzorak 1_0 pomak u Y smjeru

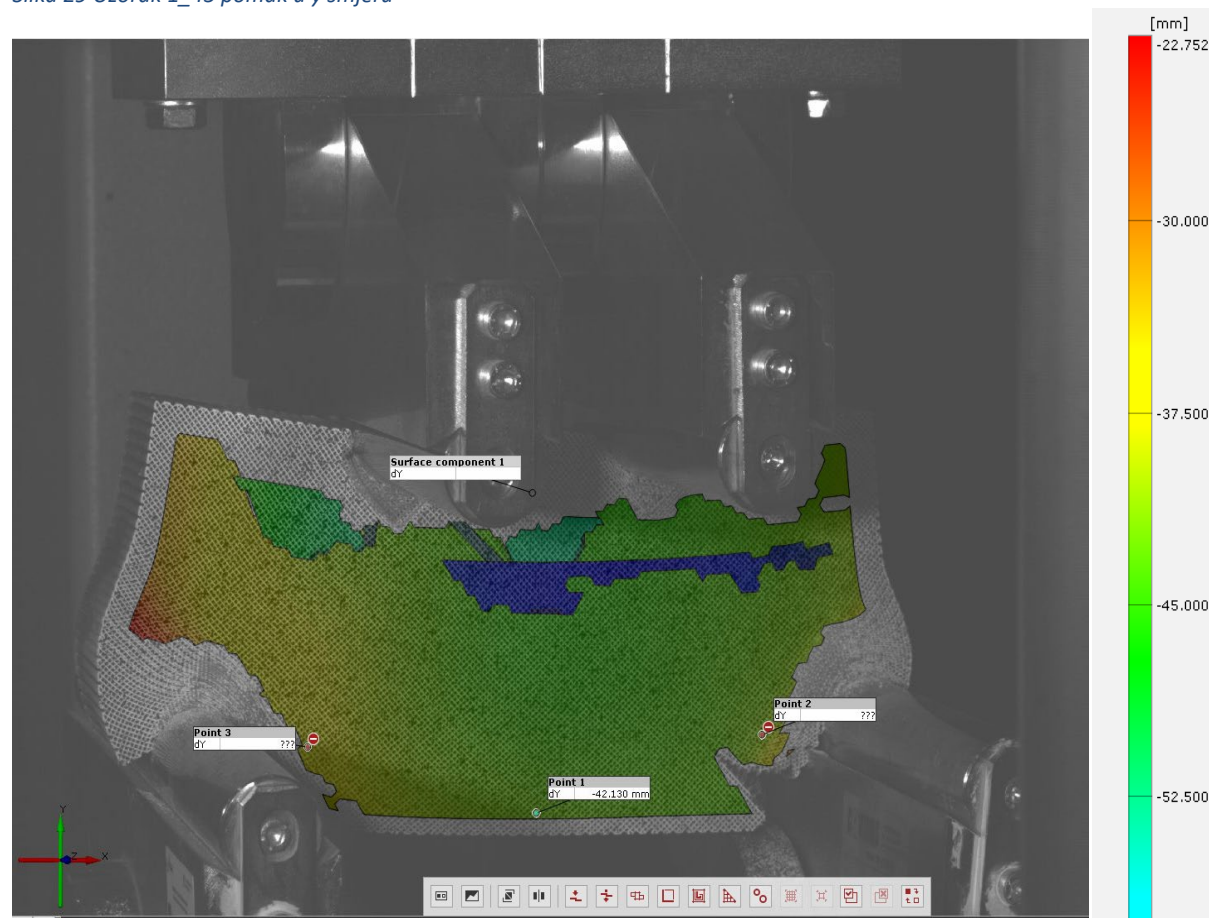
Na donjem dijelu uzorka vidi se blaga konkavnost što upućuje na djelovanje vlačnih sila u x smjeru. Graf nam prikazuje kako se cijeli uzorak spustio za približno 12 mm, tu imaju utjecaj oslonci oko kojih su se donji dijelovi uzorka omotali radi prisutnosti tlačne sile.



Početna točka označene linije nalazi se na gornjem dijelu uzorka (ispod mjesta gdje se nanosi sila). Upravo se u toj točki pojavljuju tlačne deformacije. Promatra li se linija zajedno s grafom može

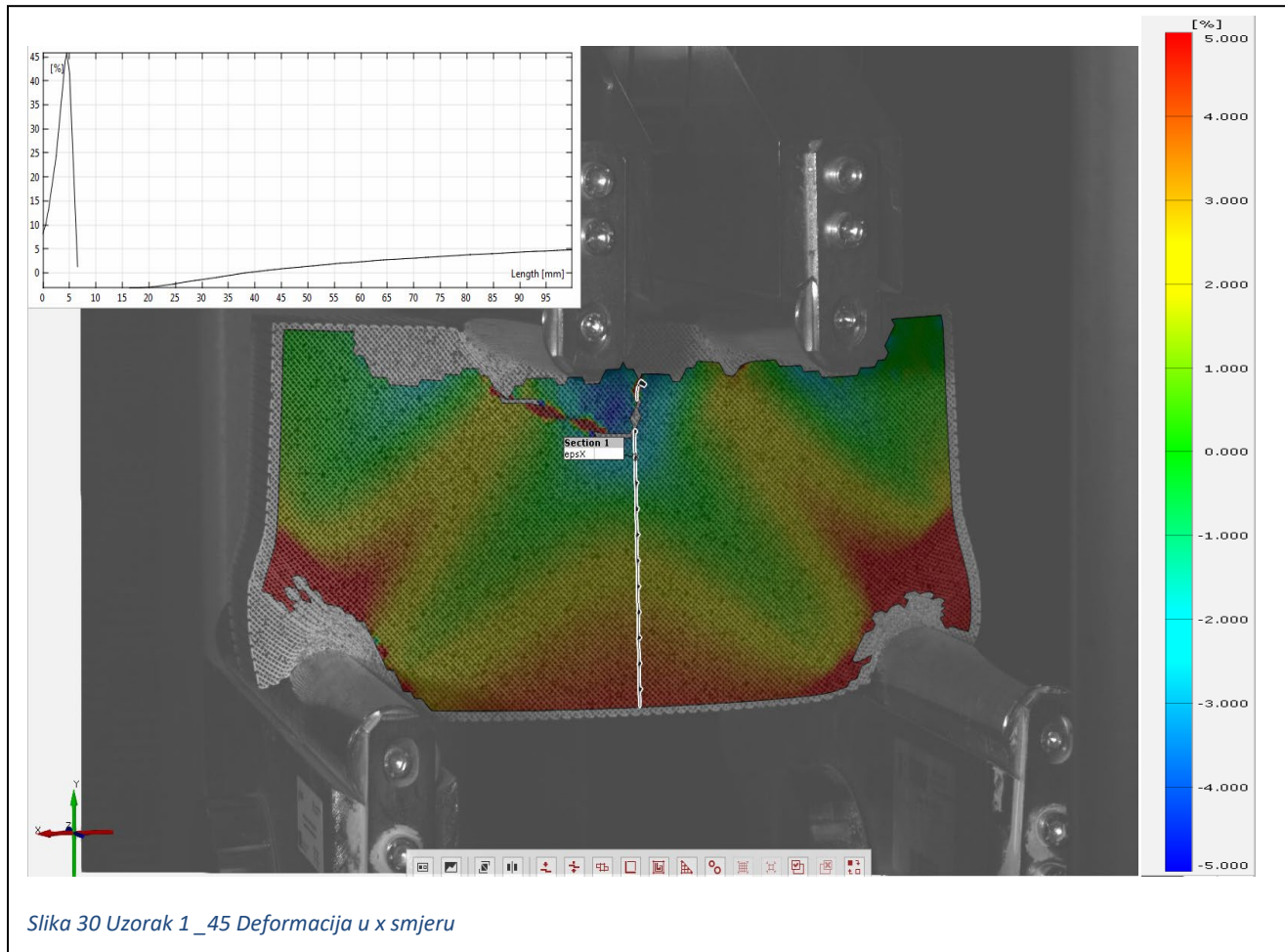
se uočiti da su vlačne deformacije odnosno naprezanja u sredini uzorka jednaka nuli. Gledajući liniju prema dolje vlačne deformacije rastu te u krajnjoj točki postižu maksimum. U početnoj točki linije javljaju se maksimalne tlačne deformacije, a u krajnjoj maksimalne vlačne deformacije u smjeru osi x. Boje na uzorku prikazuju veličinu deformacije koja je prikazana na desnoj skali. Crvena točkica pokraj lijevog oslonca potencijalno je mjesto nastanka loma.

Slika 29 Uzorak 1_45 pomak u y smjeru



Dijelovi koji nisu u boji sustav aramis nije mogao prepoznati radi prevelikih deformacija. Pomak u y smjeru iznosi 42 mm što je približno 4 puta više nego kod prijašnjeg uzorka. Iznimno velike

deformacije nastaju na osloncima što znači da tlačna naprezanja izazivaju velike deformacije kod ove strukture uzorka. Konkavnost koja bi trebala nastati pri savijanju nije izražena.

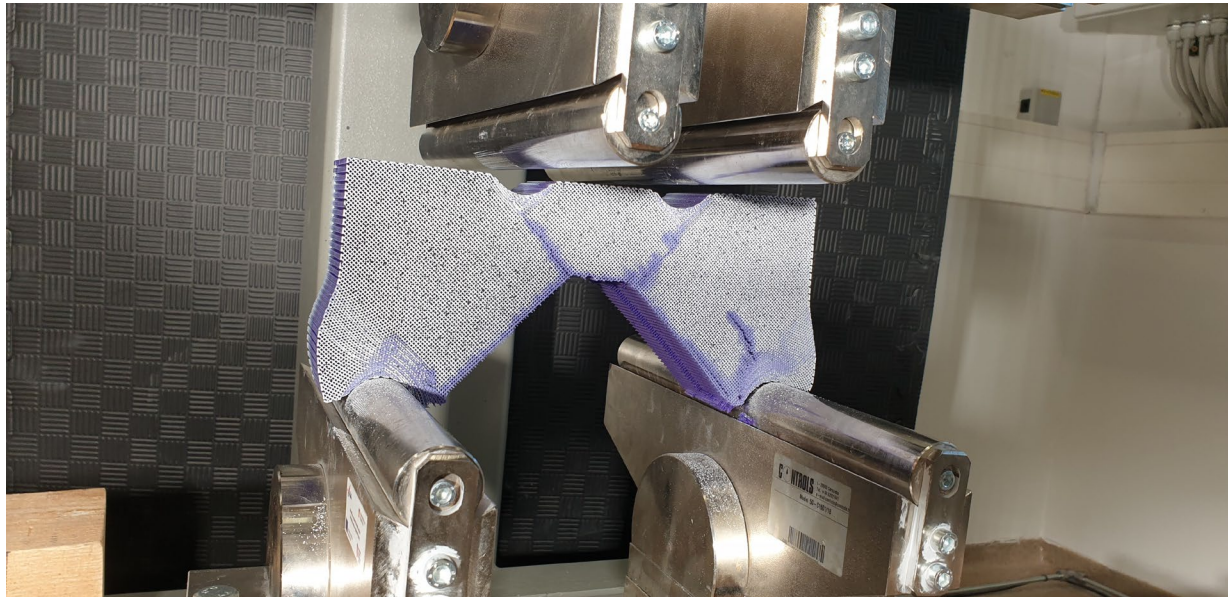


Slika 30 Uzorak 1 _45 Deformacija u x smjeru

Crvenu zonu obuhvaćaju vlačne deformacije, plavu tlačne, a u zelenoj nema deformacija ili su vrlo male. Veliki intenzitet vlačnih deformacija obuhvaća donju zonu uzorka. U sredini uzorka opet se pojavljuje neutralnost. Primjećuje se poremećaj na početku linije radi velikih deformacija. Te su deformacije nastale zbog djelovanja sila koje su izazvale tlak. Boje na površini uzorka ukazuju na mogućnost karakterizirane pojave loma.

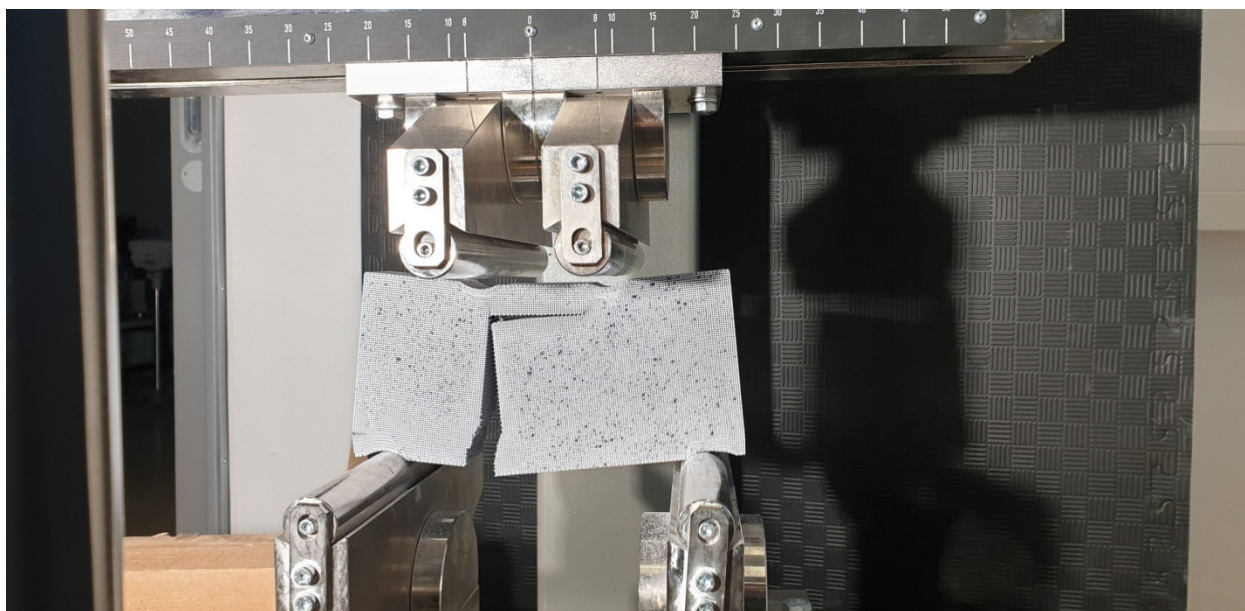
Nastali lomovi na uzorcima

Detaljnom analizom uzoraka nakon loma ustanovili smo sljedeće:



Slika 31 Uzorak 1_45

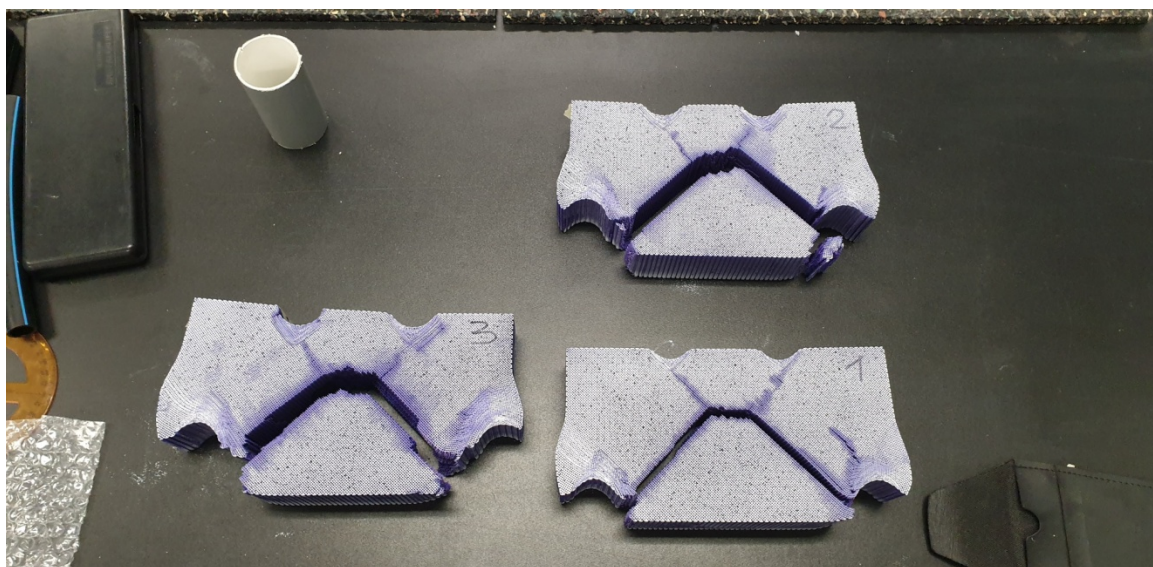
Početak pucanja uzorka dogodio se na donjem dijelu (konveksnoj strani) uzorka. Upravo tamo gdje glavno vlačno naprezanje dostiže svoj maksimum. Prema shemi (Slika br.28) vidi se da je pucanje nastalo u području gdje imamo i djelovanje poprečne sile što je jedan od razloga oblika loma koji slijedi. Pucanje se nastavilo pod kutom od 45° odnosno u smjeru ekstremnih posmičnih naprezanja. Ta se linija nastavlja dok ne uđe u zonu čistog savijanja. U toj zoni ne djeluju poprečne sile (prikazano na shemi (Slika br.28)), već imamo samo glavna naprezanja (smjera x). Upravo radi toga u tom smjeru nastupa lom, na slici vidljiv kao paralelna linija s x koordinatom. Dakle cijeli oblik sloma možemo podijeliti u dva segmenta. Lijevi lom koji je simetričan desnome te mu je oblik uzrokovan posmičnim naprezanjima. Srednji lom koji je uzrokovan čistim savijanjem.



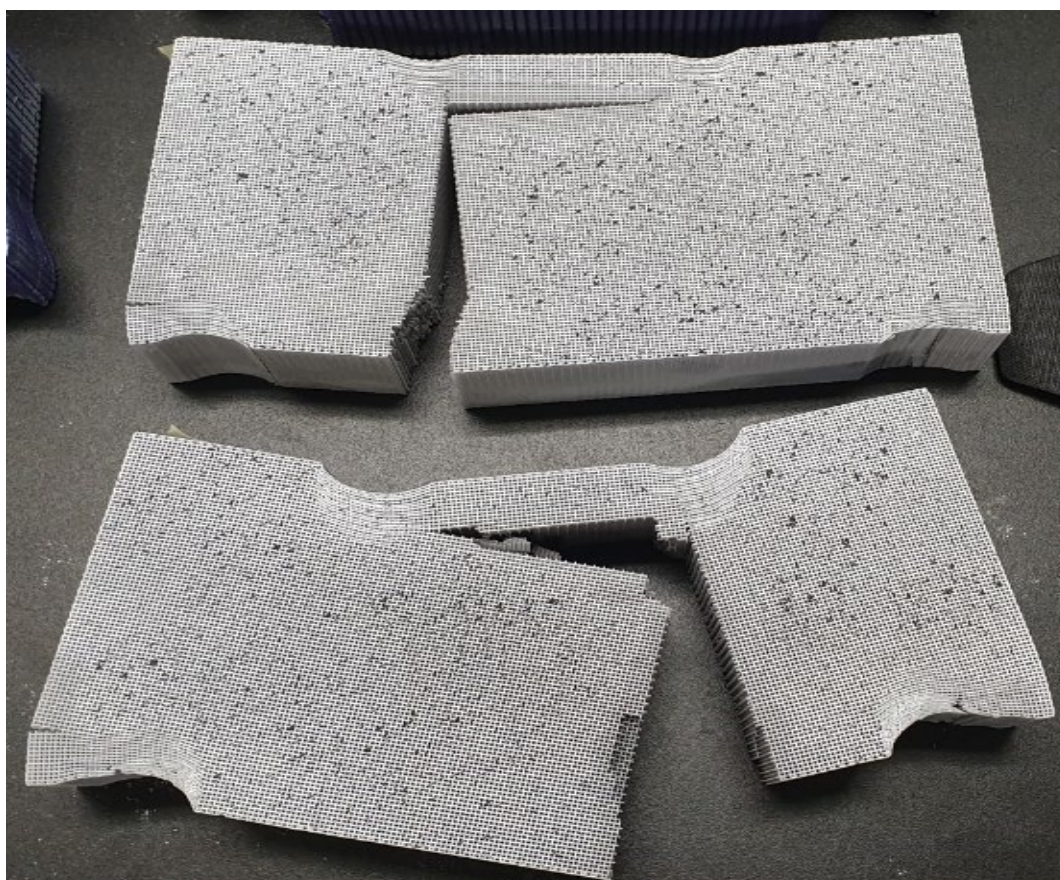
Slika 32 Uzorak 1_0

Lom je upravo nastao u onoj točki koju smo analizirali prilikom obrade slike u sustavu aramis. Početak loma nastaje radi istog razloga kao i kod prijašnjeg uzorka. Prvobitna putanja loma također je jednaka kao i kod prijašnjeg uzorka te iznosi 45° . Međutim nadalje vlakna u x smjeru popuštaju pod utjecajem normalnih naprezanja sve do dolaska u zonu čistog savijanja. U zoni čistog savijanja lom nastaje te je jednakog oblika kao i kod prijašnjeg uzorka. Lom staje u zoni čistog savijanja. Prilikom ovog ispitivanja nije došlo do simetričnog loma

Ispitivanja su provedena na 6 uzorka, 3 uzorka od svake strukture. Lomovi su ovisno o strukturi bili međusobno jednaki.



Slika 33 Prikaz loma uzoraka orijentacije vlakna 45 stupnjeva

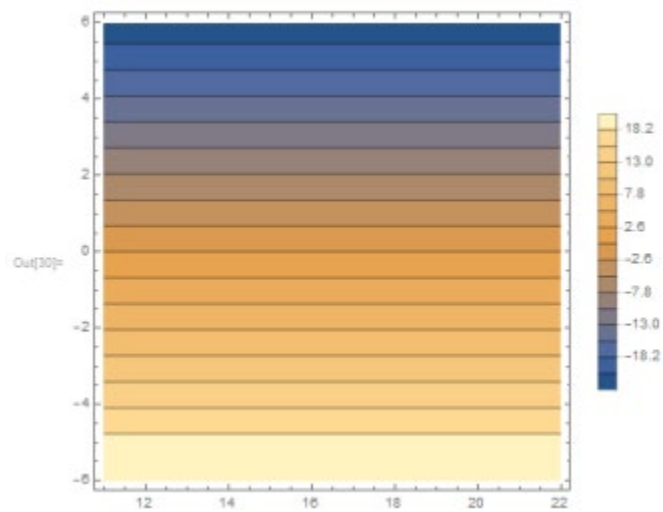


Slika 34 Prikaz loma uzoraka orijentacije vlakna 0 stupnjeva

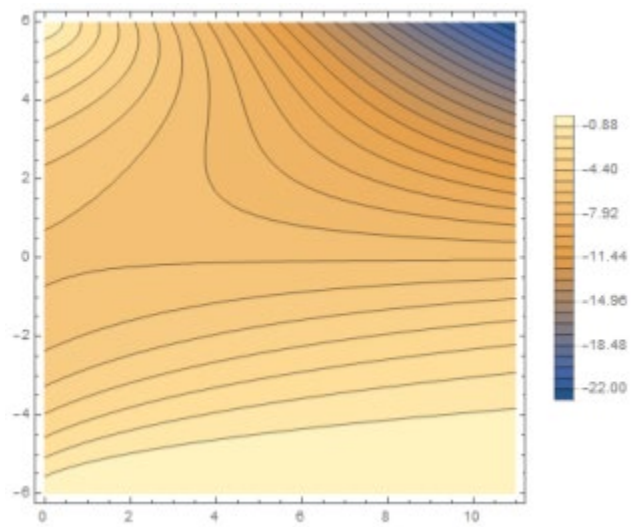
Pomoću programa Wolfram Mathematica prikazat će se polje glavnih naprezanja odnosno linije koje povezuju mjesta istih vrijednosti glavnih naprezanja (izobare). Usporedit će se dobiveni lomovi s trajektorijama glavnih naprezanja.

S obzirom da u mathematic programu ne možemo prikazati polje izobara po cijeloj površini uzorka, uzorak ćemo podijeliti u segmente te svakom segmentu dodijeliti pripadajuću sliku.

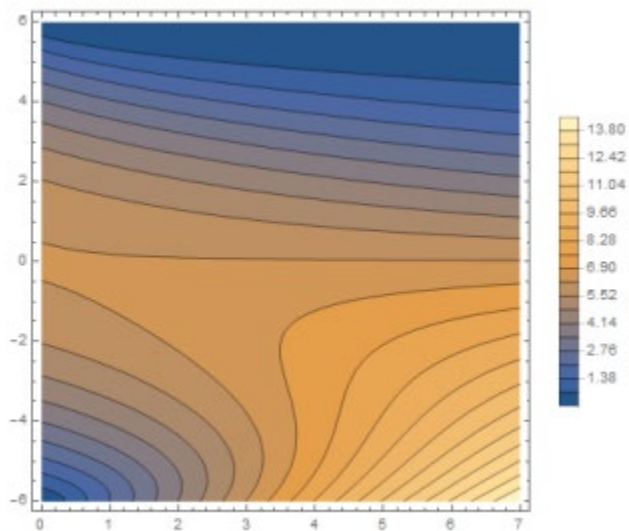
1. Zona čistog savijanja – glavna naprezanja su ujedno i normalna naprezanja jer nema posmika.



2. Glavna tlačna naprezanja(lijevo) – lom nastupa na mjestu velikih tlačnih naprezanja (na skali vidimo vrijednost velikog tlaka – 22 00



3. Glavna vlačna naprezanja (lijevo) – na skali je prikazana vrijednost velikog vlaka (13 80



4. Zaključak

U radu su opisana dva eksperimenta. Prvi je eksperiment proveden na statičkoj kidalici te su se tim eksperimentom nastojali dobiti modul elastičnosti i poissonov koeficijent. Kod uzoraka koji su printani u smjeru 45° prilikom vlačnog testa, dogodile su se velike plastične deformacije. Razlog tome prepisali smo vlaknima koja su imala “prostora” za deformaciju. Modul elastičnosti toga uzorka iznosio je 99,53 MPa. Uzrok ovog loma je samo smjer printanja. Kod drugog uzorka dogodio se drugačiji lom, a oba tipa uzorka su u istom stanju naprezanja. Modul elastičnosti kod uzorka koji je imao smjer printanja vlakna 0° iznosio je $E=494,83$ MPa što je bilo i očekivano jer je uzorak pretrpio puno veća opterećenja uz vrlo male deformacije. Radi problema na koje smo naišli prilikom analize podataka nismo mogli odrediti poissonove koeficijente uzoraka. To pripisujemo optičkom mjernom sustavu te ispunjenosti uzoraka koja je iznosila 30 %. Optički mjerni sustav radi deformacije faseta nije bio u mogućnosti dati točne podatke o koordinatama jer je vrlo malo prostora na koji možemo nanijeti uzorak sprejanjem. . Drugi eksperiment obuhvaćao je 4 point bending ispitivanja odnosno ispitivanja na čisto savijanje. Eksperiment je proveden na uzorcima prizme mikrostrukture jednake prethodnim uzorcima. Detaljno su se analizirali smjerovi pukotina te zajedno s njima deformacije u x i y smjeru ,glavna i posmična naprezanja. Također, analizirala se povezanost između linija pukotina i tizobara glavnih naprezanja dobivenih u programu Wolfram Mathematica. Zaključujemo kako su oblici loma kod uzoraka (vlakana orijentiranih pod 45°) uzrokovani posmičnim naprezanjima na rubovima jer se lom dogodio u zoni gdje postoje poprečne sile. Oblik loma uzoraka (vlakana orijentiranih pod 0°) uzrokovan je popuštanjem vlakana radi normalnih naprezanja u smjeru orijentacije vlakana. Za potpuno razumijevanje ponašanja ovakvih uzoraka s izraženom mikrostrukturom potrebno je provesti detaljniju numeričku analizu.

Literatura

1. *Prusa Research by Josef Prusa* <https://www.prusa3d.com/original-prusa-i3-mk3/> (pregledano 17. Kolovoza 2020.)
2. *Uvod u 3D printanje* <https://izradi.croatianmakers.hr/uvod-u-3d-printanje/> (pregledano 22.kolovoza 2020.)
3. *3D Printaj* <https://www.3dprintaj.com/fdm-fff-tehnologija-3d-printanja/> (pregledano 1.rujna 2020.)
4. *3D Printaj – FillamentumPLA extrafill basic* <https://www.3dprintaj.com/proizvod/fillamentum-pla-extrafill-basic/> (pregledano 1.rujna 2020.)
5. Balabanić Gojko, *Osnove znanosti o materijalima u Materijali I – skripta*
6. Šimić Vice, *Otpornost materijala I*, Školska knjiga, Zagreb 2002.
7. *Research Gate* https://www.researchgate.net/publication/312705869_A_Brief_History_of_3D_Printing, (pregledano 24.kolovoza 2020.)
8. *A brief history of 3D printing* https://sci-hub.tw/10.1007/978-1-4842-0025-4_1?fbclid=IwAR042VIVohHHDgsHkESzr_XpWbjrqyqwXuV-uxvdVejLqmeQdQnmfmIJ-3I, (pregledano 24. kolovoza 2020.)
9. *The Intersection of Inkjet and 3D Printing*, https://inkjetinsight.com/knowledge-base/the-intersection-of-inkjet-and-3d-printing/?fbclid=IwAR042VIVohHHDgsHkESzr_XpWbjrqyqwXuV-uxvdVejLqmeQdQnmfmIJ-3I, (pregledano 24. Kolovoza 2020.)