

Rekonstrukcija, aditivna izrada i funkcionalno testiranje zamjenske plastične komponente

Horvat, Antonio

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Bjelovar University of Applied Sciences / Veleučilište u Bjelovaru**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:144:330520>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository of Bjelovar University of Applied Sciences](#)



VELEUČILIŠTE U BJELOVARU
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ MEHATRONIKA

**REKONSTRUKCIJA, ADITIVNA IZRADA I
FUNKCIONALNO TESTIRANJE ZAMJENSKE
PLASTIČNE KOMPONENTE**

Završni rad br. 14/MEH/2020.

Antonio Horvat

Bjelovar, listopad 2020.



Veleučilište u Bjelovaru
Trg E. Kvaternika 4, Bjelovar

1. DEFINIRANJE TEME ZAVRŠNOG RADA I POVJERENSTVA

Kandidat: **Horvat Antonio**

Datum: 27.08.2020.

Matični broj: 001827

JMBAG: 0195031319

Kolegij: **ADITIVNE TEHNOLOGIJE**

Naslov rada (tema): **Rekonstrukcija, aditivna izrada i funkcionalno testiranje zamjenske plastične komponente**

Područje: **Tehničke znanosti**

Polje: **Strojarstvo**

Grana: **Proizvodno strojarstvo**

Mentor: **Tomislav Pavlic, mag.ing.mech.**

zvanje: **viši predavač**

Članovi Povjerenstva za ocjenjivanje i obranu završnog rada:

1. dr.sc. Stjepan Golubić, predsjednik
2. Tomislav Pavlic, mag.ing.mech., mentor
3. Danijel Radočaj, mag.inž.meh., član

2. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA BROJ: 14/MEH/2020

U radu je potrebno:

1. Napraviti i opisati trodimenzionalno skeniranje oštećene plastične komponente.
2. Napraviti i opisati reverzni inženjering plastične komponente.
3. Odraditi 3D printanje dobivenog CAD modela komponente.
4. Izvršiti mjerenje deformacija na proizvedenim komponentama.
5. Odabrati komponente s boljim svojstvima i zamijeniti oštećene komponente.

Zadatak uručen: 27.08.2020.

Mentor: **Tomislav Pavlic, mag.ing.mech.**



Zahvala

Zahvaljujem tvrtkama Topomatika d.o.o. i IZIT d.o.o. te svim njihovim zaposlenicima na utrošenom vremenu i materijalu u izradi ovog završnog rada te na pruženoj mogućnosti odrađivanja stručne prakse.

Posebice se zahvaljujem dr. sc. Nenadu Drvaru na svojoj pomoći, trudu, vremenu te svim savjetima danim prilikom izrade završnog rada. Hvala Vam i na pomoći oko razvoja ideje ovog završnog rada.

Također, zahvaljujem Marku Zajecu, mag. ing. mech. na svom uloženom vremenu i materijalu iskorištenom za izradu komponenti na 3D pisaču.

Zahvaljujem još i Ivi Baržić, mag. ing. mech. na pomoći tijekom svih mjerenja i Petri Oković, mag. ing. mech. što je uvijek bila spremna pomoći u razrješavanju problema.

Veliko hvala i mom mentoru, prof. Tomislavu Pavlicu, mag. ing. mech. na pruženim materijalima i pomoći za vrijeme izrade završnog rada.

Sadržaj

1. UVOD	1
2. 3D SKENIRANJE	2
2.1. Optički 3D skener – stereofotogrametrija	2
2.1.1. ATOS Q.....	3
2.1.2. ATOS Core 200	4
2.2. Priprema uzorka.....	5
2.3. Priprema 3D skenera.....	6
2.4. Postupak skeniranja	7
3. POVRATNO INŽENJERSTVO.....	13
3.1. Reverzni inženjering plastične kopče u Geomagic Design X-u	13
4. 3D ISPIS	26
4.1. Vrste aditivnih tehnologija	27
4.2. FDM/FFF tehnologija.....	31
4.2.1. Zortrax M200 3D pisac	33
4.2.2. Korišteni polimerni materijali.....	34
4.3. Postupak 3D ispisa.....	36
4.3.1. Rezultati 3D ispisa	40
5. ARAMIS MJERNI SUSTAV.....	42
5.1. Priprema uzorka.....	43
5.2. Kidalica.....	44
6. ISPITIVANJA I MJERENJA.....	46
6.1. Mjerenje progiba	46
6.1.1. Postupak mjerenja	46
6.1.2. Rezultati mjerenja	49
6.2. Dinamičko cikličko ispitivanje	54
6.2.1. Parametri ispitivanja	55
6.2.2. Rezultati mjerenja iz LabMastera.....	56
6.2.3. Mjerenje deformacija	58
6.3. Statičko ispitivanje	60
6.3.1. Postupak ispitivanja.....	61
6.3.2. Rezultati ispitivanja	62
7. PREINAKA DIZAJNA KOPČE	73

7.1. Redizajn u Geomagic Design X	73
7.2. Aditivna izrada redizajnirane kopče	74
7.3. Statičko ispitivanje redizajnirane kopče	75
8. ZAKLJUČAK	82
9. LITERATURA	83
10. OZNAKE I KRATICE	85
11. SAŽETAK	86
12. ABSTRACT	87

1. UVOD

U ovom završnom radu će biti objašnjen cijeli postupak rekonstrukcije oštećene plastične komponente. Komponenta koja se proizvodi aditivnim tehnologijama je plastična kopča ručke male ručne prtljage za koju ne postoji rezervni dio te ne postoji mogućnost nabave na tržištu. S obzirom da ne postoji mogućnost zamjene plastične kopče, jedino što preostaje je kupovina nove ručne prtljage ili rekonstrukcija oštećene komponente pomoću tehnologija aditivne izrade i povratnog (reverznog) inženjeringa, tehnologije koje će biti opisane u ovom završnom radu.

Ideja rada je postepeno opisati postupak, korištenu tehnologiju i opremu za izradu plastične komponente postepeno od 3D skeniranja, povratnog inženjeringa skeniranog uzorka, 3D aditivne izrade, mjerenje progiba pomoću 3D optičkog skenera, dinamičkog cikličkog ispitivanja te statičkog ispitivanja komponente na savijanje.

3D ispisani modeli plastične kopče ručke ručne prtljage se zatim skeniraju na 3D optičkom skeneru prije dinamičkog cikličkog ispitivanja te neposredno nakon istog ispitivanja da bi se izmjerila nastala plastična deformacija uzorka kopče.

Nakon ispitivanja i 3D skeniranja radi se rekonstrukcija modela na temelju dobivenih rezultata statičkog i dinamičkog ispitivanja, model se proizvodi na 3D pisaču te se nanovo radi statičko ispitivanje novog rekonstruiranog modela plastične komponente.

3D model plastične kopče ručke je za potrebe ispitivanja svojstava proizveden na Zortrax M200 3D pisaču od tri različita polimerna materijala: Z-ABS, Z-ASA Pro te Z-ULTRAT. Iako postoji mnogo različitih pristupa i tehnologija u svijetu aditivnih tehnologija i 3D skeniranja, u sljedećim poglavljima će biti opisana isključivo tehnologija, alati i materijali koji su korišteni za izradu nove plastične komponente.

2. 3D SKENIRANJE

3D skeniranje je beskontaktni proces prikupljanja podataka s površine objekta i pretvaranje istih u digitalni skup točaka sa svojim koordinatama kako bi se stvorila precizna 3D geometrija skeniranog objekta. U današnje vrijeme 3D skeniranje se najviše koristi za potrebe kontrole kvalitete, povratnog inženjersva, rekonstrukcije, 3D vizualizacije objekta te 3D ispisivanja. Dvije najčešće korištene tehnologije beskontaktnog 3D skeniranja su laserska i optička tehnologija.

Laserski skeneri rade na principu triangulacije snopa laserske zrake koji obasjava površinu skeniranog predmeta. Laserska zraka izlazi iz jednog izvora svjetlosti te stvara liniju na površini predmeta koju promatra i snima senzor kamere. Izvor laserske zrake i senzor kamere se nalaze pod različitim kutom koji se utvrđuje prethodnim kalibriranjem 3D skenera. S obzirom da je sada kut između senzora kamere i izvora laserske zrake poznat, moguće je pomoću triangulacije izračunati udaljenost između skeniranih točaka s površine predmeta i samog izvora laserske zrake [1, 2].

Za potrebe završnog rada korišteni su optički 3D skeneri ATOS Core 200 i ATOS Q koji rade na principu stereofotogrametrije.

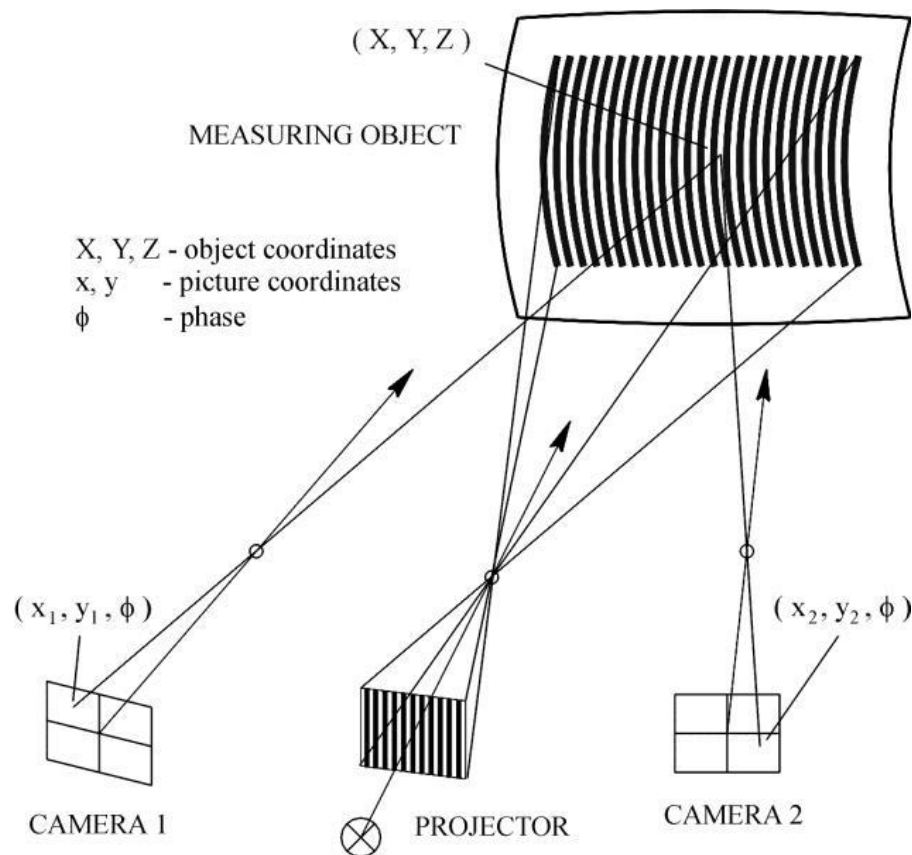
2.1. Optički 3D skener – stereofotogrametrija

Optički 3D skeneri se sastoje od projektora i dvije ili više kamere te također rade na principu triangulacije. Projektor se nalazi u sredini kućišta dok se kamere nalaze lijevo i desno od projektora pod određenim kutom. Projektor skenera projicira različite uzorke linija na skenirani predmet koje zatim dvije kalibrirane kamere snimaju te računalo vrlo točno izračunava njihove koordinate po sve tri osi (X, Y, Z). Senzori kamere očitavaju (snimaju) informacije o koordinatama sa samih rubova projiciranih linija na površini predmeta. Softver za 3D skeniranje na računalo zatim pomoću algoritama stvara digitalnu sliku svih snimljenih točaka s njihovim koordinatama te stvara „oblak točaka“ koji detaljno i točno opisuje geometriju skeniranog predmeta [1, 2].

Postoje dvije glavne vrste 3D optičkih skenera, skeneri koji projiciraju bijelu svjetlost te skeneri s projekcijom plave svjetlosti. Skeneri s projektorima bijele svjetlosti se koriste preko dvadeset i pet godina, praktičniji su i brži od standardnih laserskih 3D skenera. Negativna strana skenera koji projiciraju uzorke linija s bijelom svjetlosti je sama valna duljina projicirane svjetlosti. Bijela svjetlost je sastavljena od svih boja vidljivog spektra, odnosno ima spektar svih valnih duljina vidljivog spektra. Vrlo lako može doći do interferencije između projicirane

svjetlosti i svjetlosti iz okruženja 3D skenera te zbog toga može doći do netočnih snimaka ukoliko se skeniranje odvija u jako osvijetljenim prostorijama.

3D skeneri s projektorom plave svjetlosti su moderniji i napredniji od prethodnika koji koriste bijelu svjetlost za projekciju uzoraka. Izvor svjetlosti u projektoru su LED diode, prednost plave svjetlosti je kratka valna duljina, samim time je lakše filtrirati smetnje svjetlosti iz okoline prilikom 3D skeniranja. Ovi skeneri su točniji, precizniji i rezultati skeniranja su kvalitetniji, odnosno snimke su veće rezolucije nego kod 3D skenera koji koriste bijelu svjetlost [2, 3].



Slika 2.1: Shematski prikaz stereo postave 3D optičkog skenera i uzorka linija [4].

2.1.1. ATOS Q

3D optički skener ATOS Q proizvođača GOM je korišten za skeniranje plastične kopče ručke ručne prtljage. ATOS Q ima projektor linijskih uzoraka plave boje te dvije kamere koje snimaju projekcije linija. Ima mogućnost zamjene tri različita seta leća na kamerama te time može mijenjati mjerni volumen 3D skenera ovisno o veličini predmeta koji se skenira. ATOS Q koji je korišten za skeniranje je verzija 12M, odnosno svaki senzor kamere može snimiti do dvanaest milijuna koordinatnih točaka po snimci. Ovaj 3D skener je izuzetno brz, za svaku

snimku je potrebno dvije do tri sekunde za obradu. Detaljnija specifikacija uređaja se može vidjeti u tablici 2.1 [5].

Tablica 2.1: Specifikacija 3D skenera ATOS Q 12M [5].

Izvor svjetla	LED rasvjetna tijela
Maksimalna rezolucija	12 milijuna
Mjerno područje [mm ²]	100 x 70 do 500 x 370
Udaljenost između točaka [mm]	0,03 do 0,12
Optimalna udaljenost [mm]	490
Masa [kg]	4
Dimenzije [mm]	340 x 240 x 83
Mjerni volumen [mm]	100, 170, 270, 350 i 500



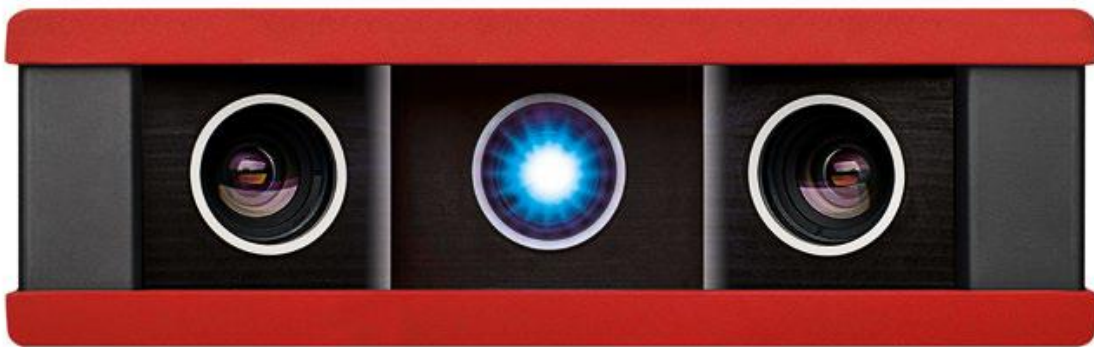
Slika 2.2: ATOS Q 12M [5].

2.1.2. ATOS Core 200

Skener ATOS Core 200 je korišten za mjerenje progiba i deformacija u realnom vremenu preko sustava ARAMIS. Proizvođač ovog 3D optičkog skenera je GOM, radi na istoj tehnologiji strukturirane plave svjetlosti, ima manji fiksni mjerni volumen i manju maksimalnu rezoluciju naspram ATOS Q 12M optičkog skenera. Ovaj uređaj je kompaktniji, lakši, minimalna udaljenost između snimljenih točaka je 0,08 milimetara te se češće koristi kod skeniranja manjih predmeta [6].

Tablica 2.2: Specifikacija 3D skenera ATOS Core 200 [6].

Izvor svjetla	LED rasvjetna tijela
Maksimalna rezolucija	5 milijuna
Mjerno područje [mm ²]	200 x 150
Udaljenost između točaka [mm]	0,08
Optimalna udaljenost [mm]	250
Masa [kg]	2,10
Dimenzije [mm]	206 x 205 x 64
Mjerni volumen [mm]	200



Slika 2.3: ATOS Core 200 [6].

2.2. Priprema uzorka

Prije samog postupka 3D skeniranja potrebno je pripremiti predmet skeniranja i optički skener. Ukoliko je objekt transparentan, ima jaku refleksiju ili je teško vidljiv senzoru kamere, potrebno je nanijeti tanak sloj bijelog pigmenta titanijeva dioksida (TiO₂) otopljenog u vodi pomoću zračnog kista. Sloj pigmenta mora biti dovoljno debeo da ukloni refleksiju ali i dovoljno tanak da ne utječe na geometriju samog predmeta, u ovom slučaju zadebljanja stijenke. Nakon što se ukloni moguća refleksija, postavljaju se referentne točke na površinu predmeta. Referentne točke su naljepnice koje softver za 3D skeniranje ATOS Professional 2020 prepoznaje i kodira svaku pojedinačno. Te točke služe 3D skeneru kao orijentacija, pomažu mu da „shvati“ gdje se nalazi u svakom trenutku. Referentne točke su potrebne da se više snimaka spoji u jednu cjelinu i u jedan zajednički koordinatni sustav. Za kvalitetno 3D skeniranje s ATOS uređajima i softverskim rješenjima potrebno je da dvije snimke 3D skenera koje se spajaju imaju minimalno 4 zajedničke referentne točke. Referentne točke se lijepe na ravne ili blago zakrivljene plohe predmeta te moraju biti udaljene nekoliko milimetara od rubova da bi 3D skeniranje bilo što točnije. Razlog tome je što 3D skener snima površinu naljepnice referentne točke te ne može

snimiti površinu ispod nje. Referentne točke koje su korištene pri 3D skeniranju i kasnijem mjerenju su imale dimenzije od 0,80 milimetara te se mogu vidjeti na slici 2.4.



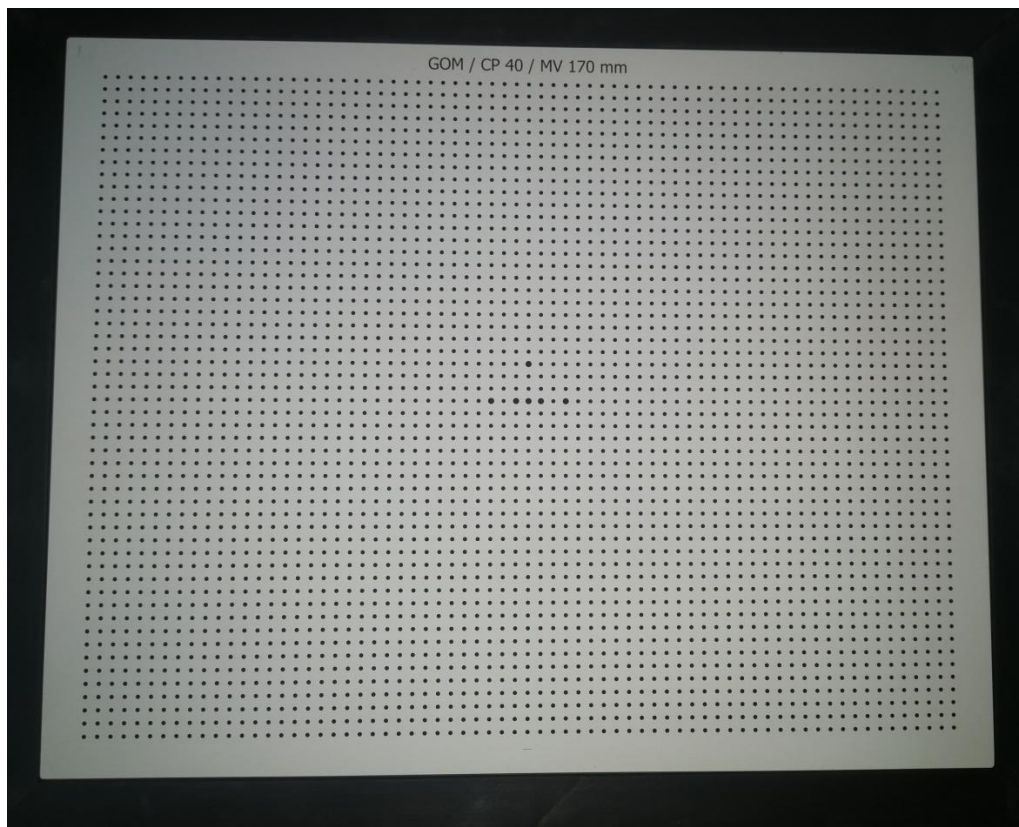
Slika 2.4: Korištena oprema i referentne točke (0,80 mm).



Slika 2.5: Fotografija oštećene plastične kopče ručke s referentnim točkama na površini.

2.3. Priprema 3D skenera

Priprema 3D optičkog skenera se sastoji od paljenja i inicijalizacije skenera u programu ATOS Professional 2020 te procesa zagrijavanja koji prosječno traje između petnaest i dvadeset minuta. Za što točnije i kvalitetnije 3D skeniranje potrebno je kalibrirati skener. Svaki ATOS 3D optički skener ima svoju kalibracijsku ploču za određeni mjerni volumen. Proces se sastoji od mjerenja temperature okoline u kojoj se skenira, unosa iste u softver te skeniranja kalibracijske ploče po različitim visinama i različitim kutovima između ploče i kamera skenera.



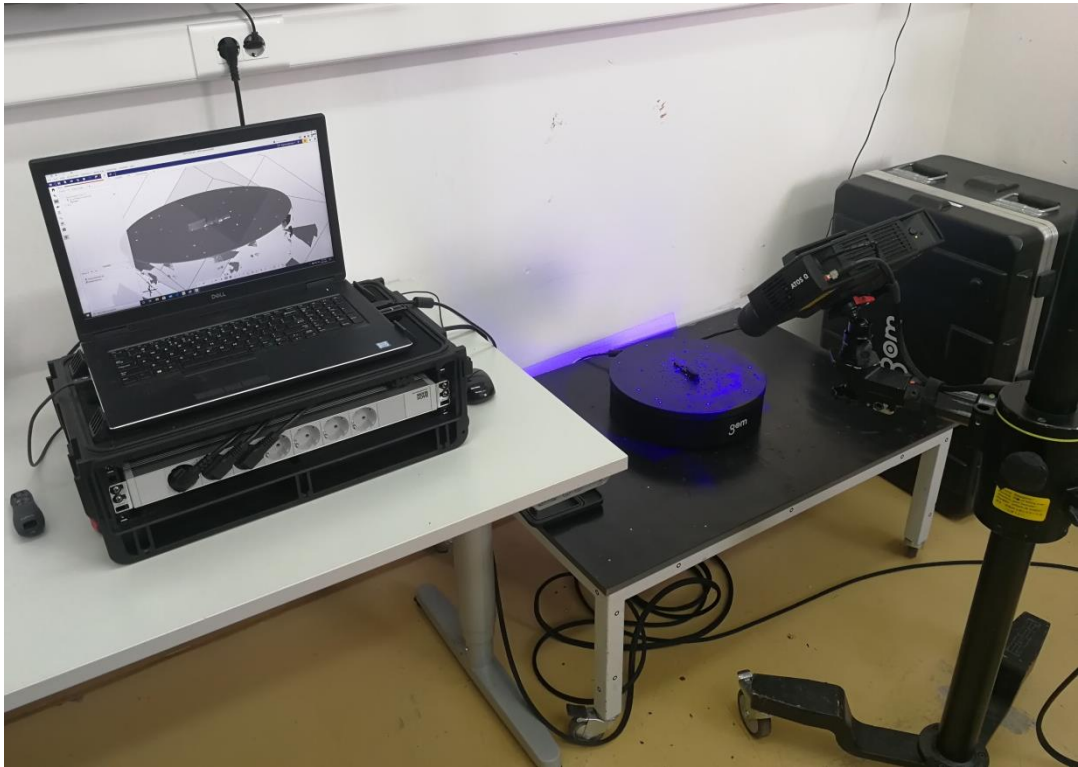
Slika 2.6: Kalibracijska ploča 3D skenera ATOS Q za mjerni volumen od 170 mm.

2.4. Postupak skeniranja

Nakon svih odrađenih pripremnih radnji na predmetu i 3D optičkom skeneru, može se započeti s postupkom skeniranja.

Prvo što se radi je postavljanje uzorka na rotacijsku ploču, uzorak se pričvršćuje pomoću ljepljive gline na minimalno tri mjesta. Predmet mora biti fiksiran na plohu ploče jer ako se nehotice pomakne doći će do nekvalitetnog skeniranja ili softver neće moći prepoznati referentne točke. U slučaju da dođe do toga, najbolje je bolje pričvrstiti predmet te započeti novo 3D skeniranje. Na rotacijskoj ploči se također nalaze referentne točke koje olakšavaju 3D skeniranje i spajanje snimaka u jednu cjelinu i jedan koordinatni sustav.

Postava za 3D skeniranje predmeta sa slike 2.7 se sastoji od 3D optičkog skenera ATOS Q, pokretnog stalka na koji je 3D skener pričvršćen, prijenosnog računala, GOM automatskog rotacijskog stola, optičkog kabela koji spaja 3D skener s računalom te strujnog adaptera za skener. Programski alat koji se koristi za 3D skeniranje je ATOS Professional 2020.

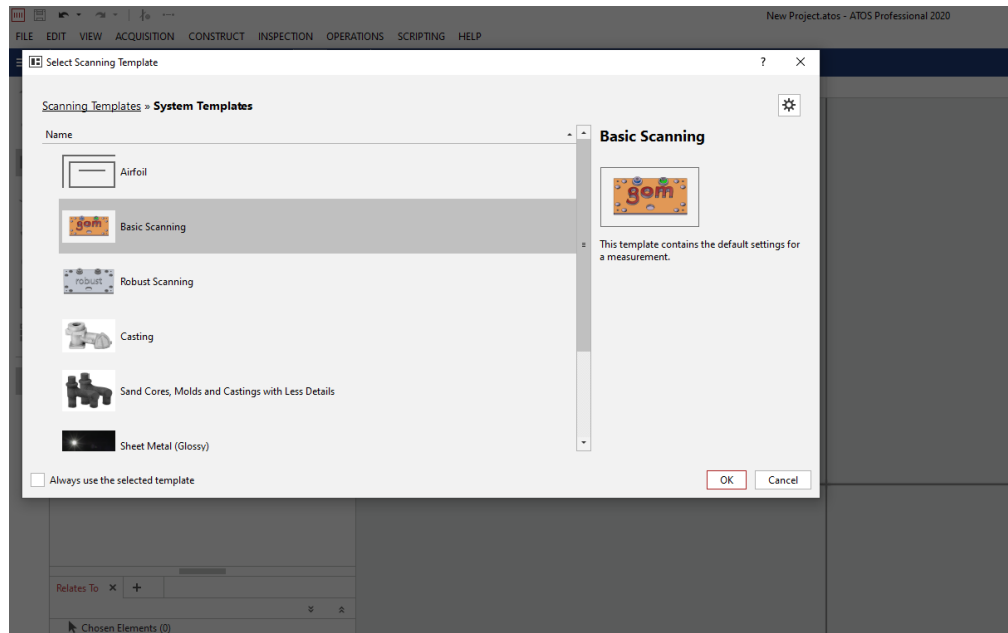


Slika 2.7: Postavljena oprema za 3D skeniranje.



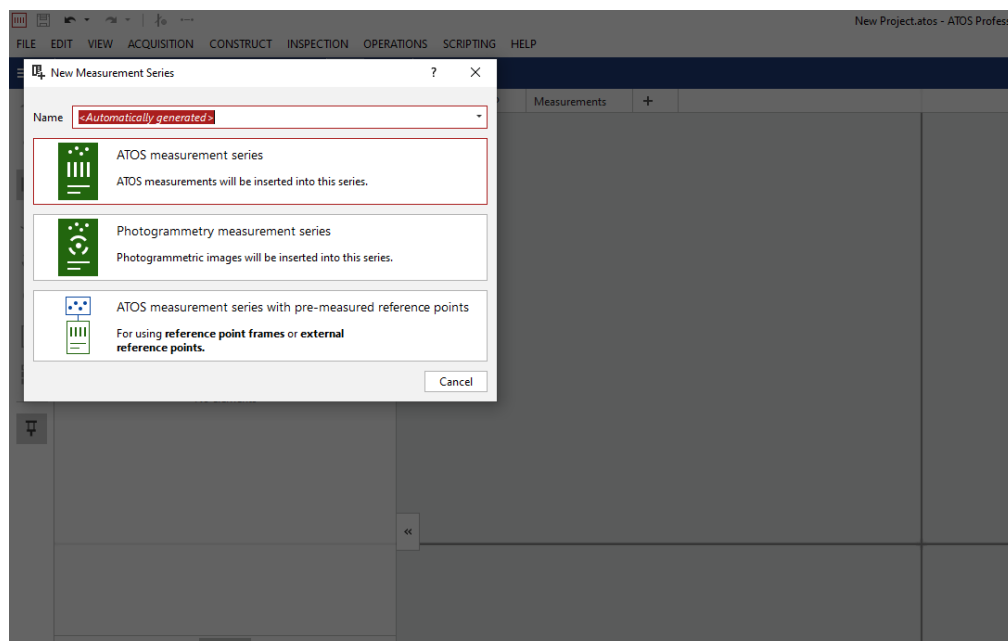
Slika 2.8: Pričvršćeni uzorak na automatskom rotacijskom stolu tijekom skeniranja s ATOS Q 3D skenerom.

Nakon što je oprema postavljena, u programu ATOS Professional 2020 se otvara novi projekt. Odabire se predložak skeniranja, u ovom slučaju je to „*Basic Scanning*“ predložak što je vidljivo na slici 2.9.

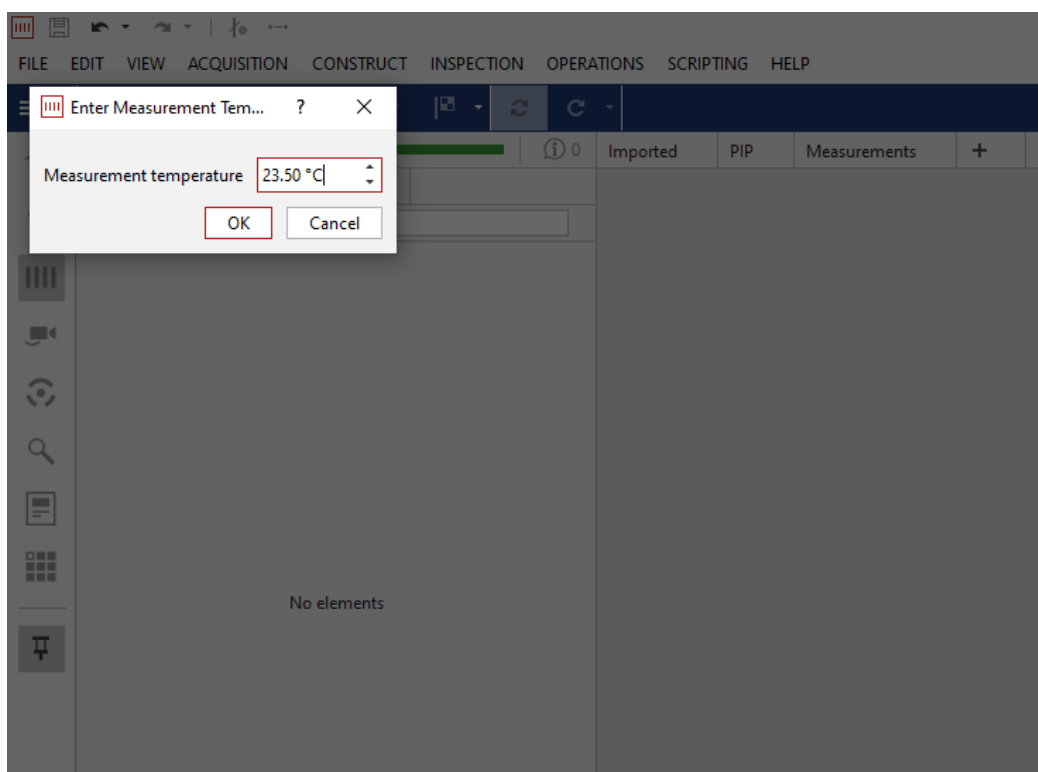


Slika 2.9: Odabir predloška za 3D skeniranje.

Odabire se nova ATOS mjerna serija (slika 2.10) i upisuje se izmjerena temperatura okoline, u ovom slučaju je ona iznosila 23,50 °C. (slika 2.11).



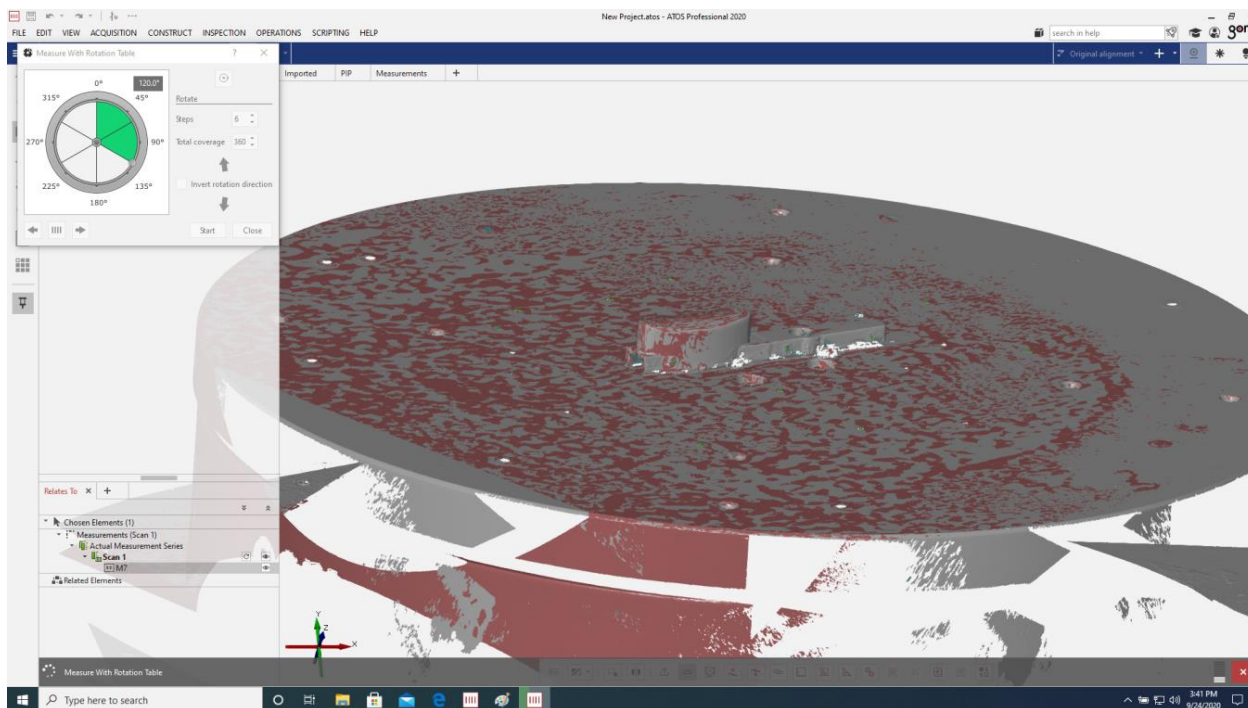
Slika 2.10: Odabir ATOS mjerne serije.



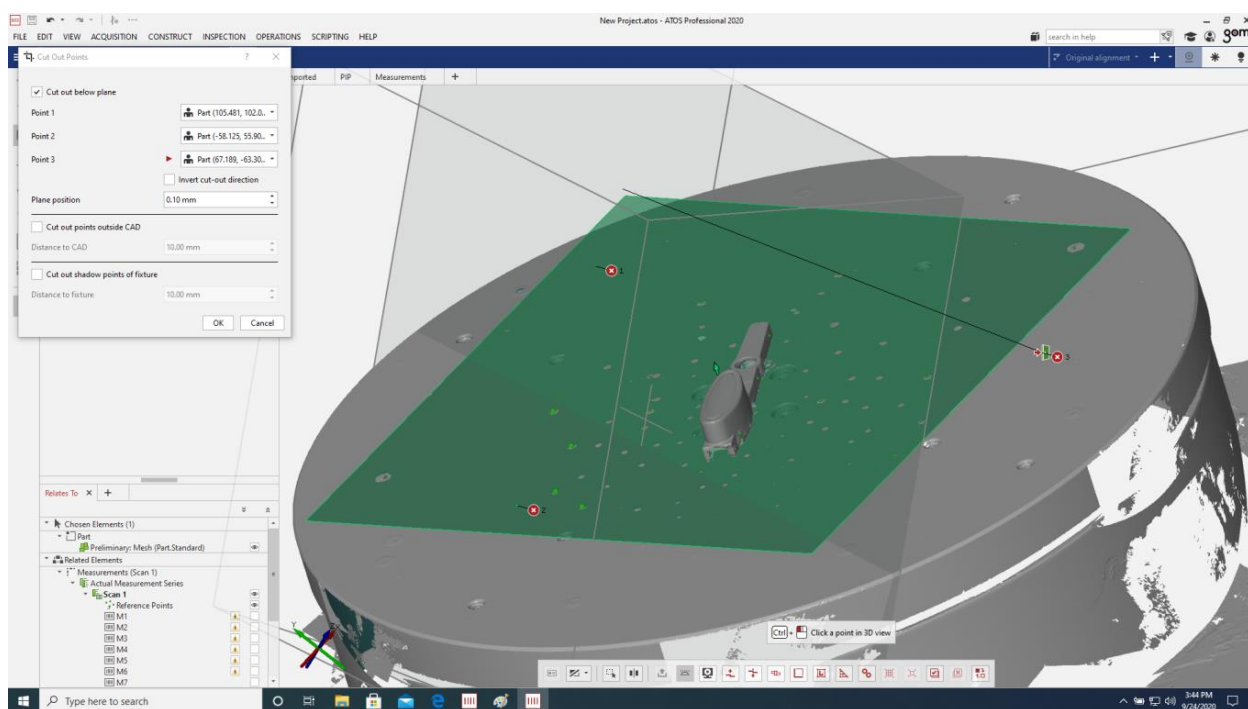
Slika 2.11: Unos temperature okoline.

U postavkama se odabire mjerenje s rotacijskim stolom, postavlja se šest koraka mjerenja, između svakog koraka je šezdeset stupnjeva razlike kao što je moguće vidjeti na slici 2.12. Crvenom bojom su prikazani novi izmjereni podaci dobiveni zadnjom snimkom 3D skenera. Svi ti skenirani podaci sa svojim koordinatama tvore „oblak točaka“ koji precizno opisuje geometriju kopče i samog rotacijskog stola kao što je vidljivo na slici 2.13. Zelene točke koje su vidljive na površini „oblaka točaka“ predstavljaju prepoznate kodirane referentne točke.

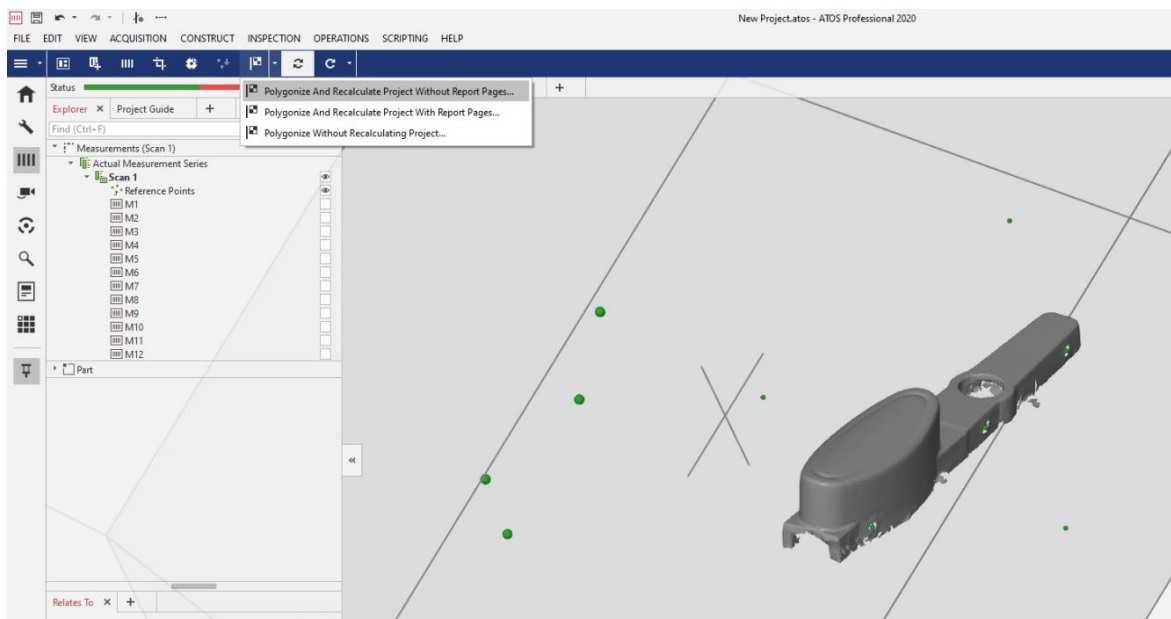
Nakon završene mjerne serije skenera, potrebno je urediti 3D snimku. Pod uređivanje se smatra uklanjanje viška točaka koje opisuju oblik rotacijskog stola, odnosno podloge te viška od ljepljive gline koja je držala predmet za podlogu. Softver još ima i mogućnost popunjavanja rupa unutar oblaka ali se u praksi to radi samo ako je neophodno. Poslije uklanjanja viška skeniranih točaka potrebno je poligonizirati „oblak točaka“ te se time završava 3D skeniranje (slika 2.14).



Slika 2.12: Mjerenje pomoću GOM automatskog rotacijskog stola, crvenom bojom vidljivi najnovije izmjereni podaci.

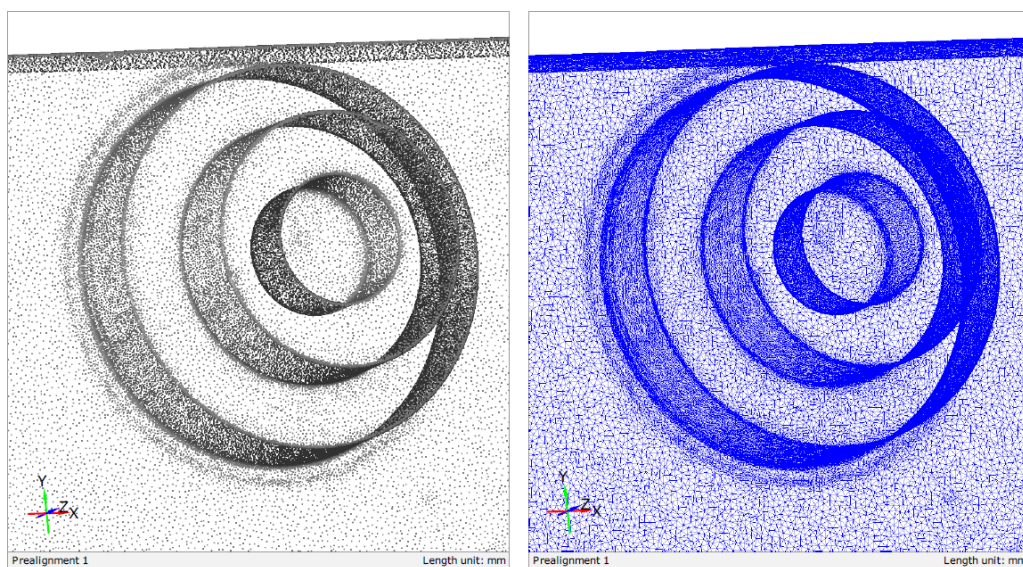


Slika 2.13: Prikaz skenirane geometrije i proces uređivanja snimki.



Slika 2.14: Pretvorba „oblaka točaka“ u poligonalnu mrežu.

ATOS programski paketi poligoniziraju mrežu predmeta s vrlo visokom rezolucijom na način da se točke unutar oblaka povezuju u male trokute. Na zakrivljenim površinama je veća gustoća točaka te se postavljaju mali trokuti dok se na ravnim dijelovima površine objekta postavljaju veći trokuti. Poligonalne mreže se sastoje i od nekoliko milijuna trokuta i tako detaljno opisuju mjereni objekt [4]. Na slici 2.15 se može vidjeti razlika između „oblaka točaka“ i poligonalne mreže trokuta, takozvanog *mesh-a*. Gotovi skenirani predmet se može spremiti u STL format koji dalje služi za izradu CAD 3D modela pomoću povratnog inženjeringa.



Slika 2.14: Prikaz „oblaka točaka“ (lijevo) i poligonalne mreže trokuta (desno) [7].

3. POVRATNO INŽENJERSTVO

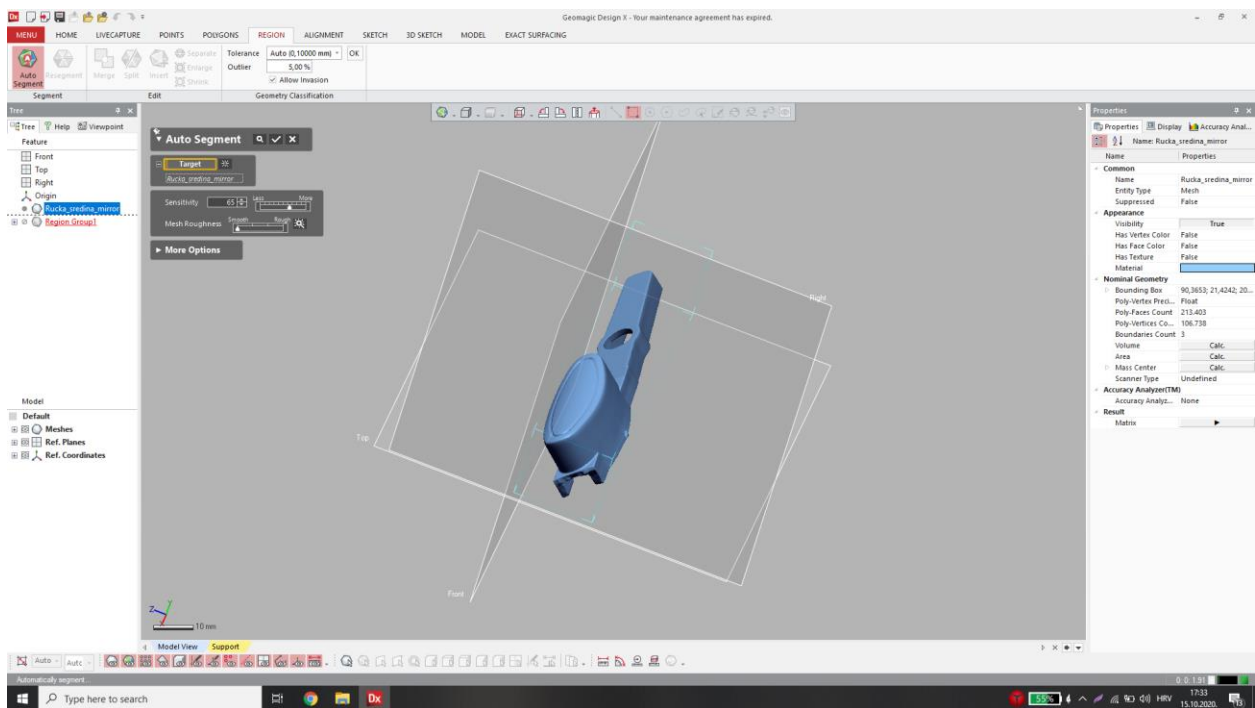
Povratno inženjerstvo ili reverzni inženjering je proces digitalne rekonstrukcije fizičkog proizvoda u oblik iz kojeg se mogu izraditi novi dijelovi i alati. Sastoji se od procesa 3D skeniranja predmeta (digitalizacija predmeta) te 3D modeliranja na osnovu dobivenih podataka [8].

Za potrebe ovog završnog rada koristi se Geomagic Design X programski alat za povratno inženjerstvo kojeg je razvila američka tvrtka 3D Systems. Geomagic Design X je softver u kojem je moguće manipulirati poligonalnim mrežama, odnosno STL (engl. *Stereolithography*) datotekama skeniranih predmeta i iz njih razvijati CAD (engl. *Computer aided design*) 3D model što sličniji originalnom predmetu. CAD model koji se stvori ovim programskim alatom je moguće eksportirati sa svim značajkama i otvoriti u ostalim poznatim CAD alatima poput SolidWorks-a.

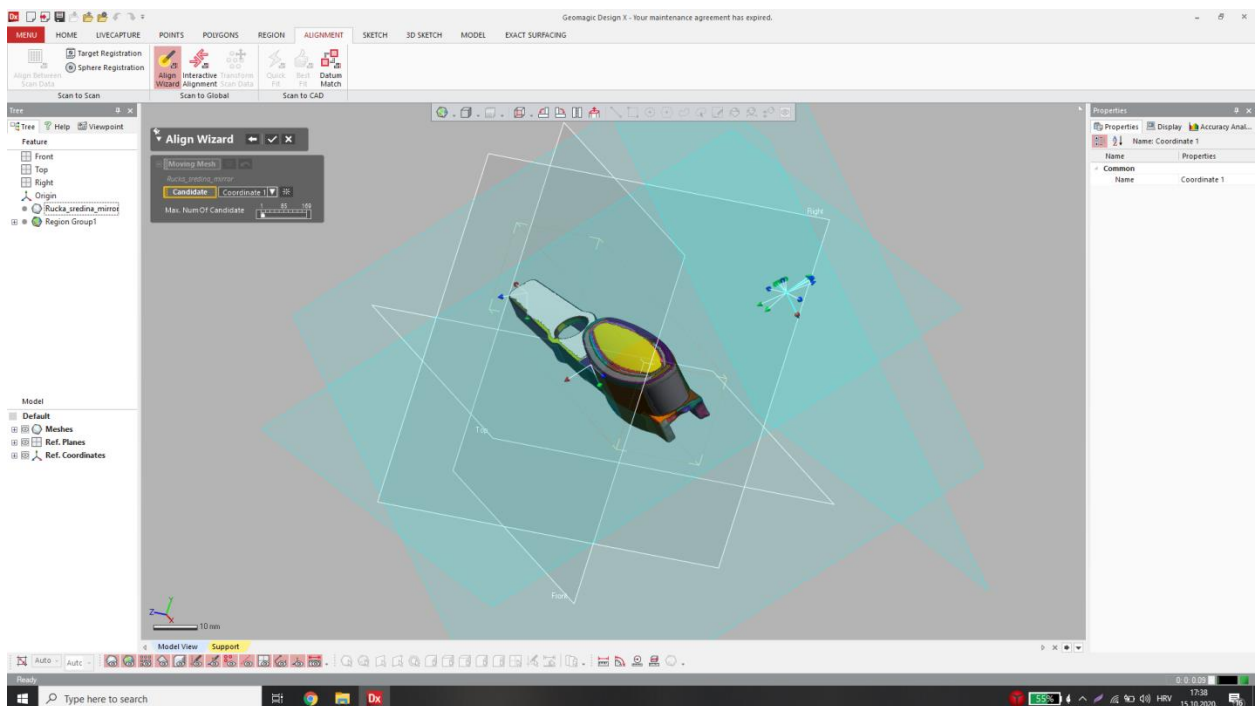
3.1. Reverzni inženjering plastične kopče u Geomagic Design X-u

U ovom poglavlju je opisan cjelokupan postupak stvaranja CAD modela plastične kopče ručke iz *mesh-a* dobivenog poligonizacijom točaka iz 3D mjerenja. *Mesh* je engleski naziv za mrežu poligoniziranih trokuta dobivenih spajanjem točaka dobivenih od 3D mjerenja skenerom. U Geomagic Design X-u se mješovito modelira uz pomoć površina (engl. *surface*), krutih tijela (engl. *solid*) i *mesh-a*. Ovim programskim alatom je moguće modelirati na dva načina: parametarski i egzaktni način. Parametarskim načinom modeliranja se određuju i pretpostavljaju što točnije, smislenije dimenzije koje su približne dobivenom presjeku ili skeniranom objektu, nacrti se pokušavaju dobiti standardnim geometrijskim načinima. Egzaktnim načinom modeliranja se pokušava modelirati točno onako kako skenirani objekt izgleda, vrijednosti ne moraju biti smislene i zaokružene. U ovom postupku pokušat će se dobiti 3D CAD model što sličniji originalnom predmetu egzaktnim načinom modeliranja uz dodatne minimalne preinake jer je original oštećen i potrošen na više mjesta.

Nakon 3D optičkog skeniranja predmeta, predmet se poligonizira i sprema kao STL datoteka. U Geomagic Design X-u se zatim otvara STL plastične kopče, radi se segmentacija *mesh-a* na regije sa sličnim točkama (slika 3.1) i poravnanje pomoću „*Align Wizard*“ opcije (slika 3.2).



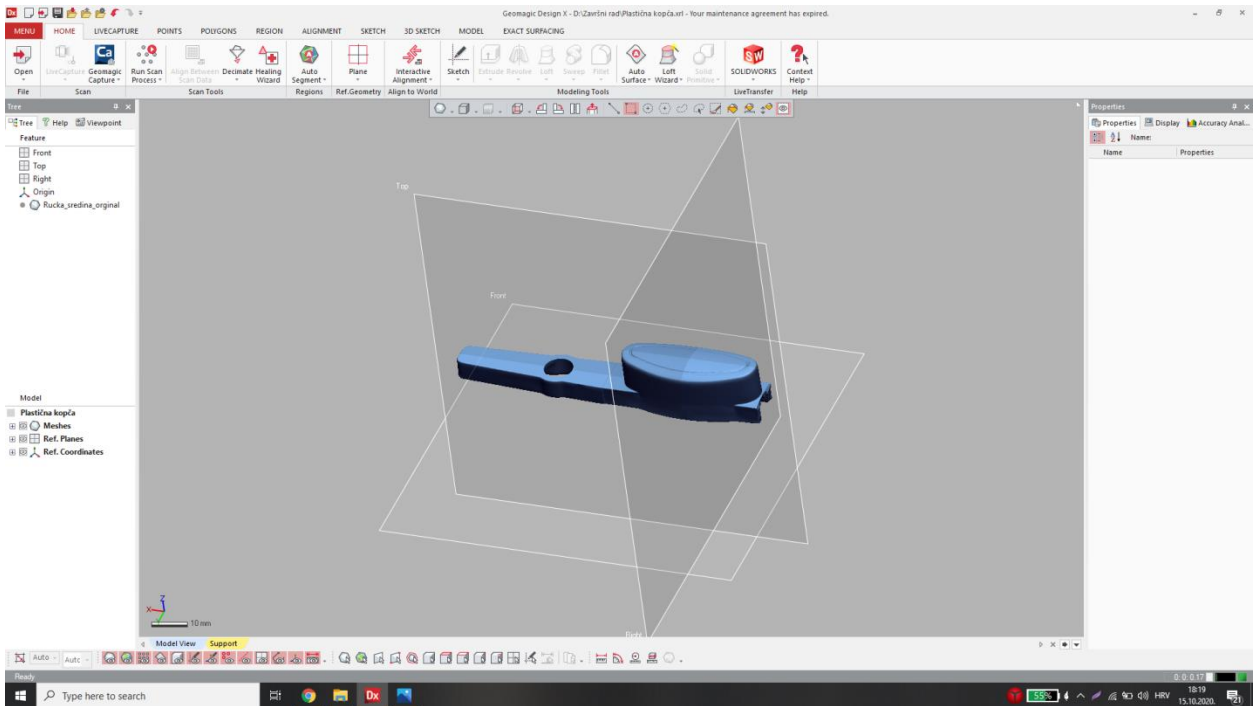
Slika 3.1: Autosegmentacija *mesh-a* u regije.



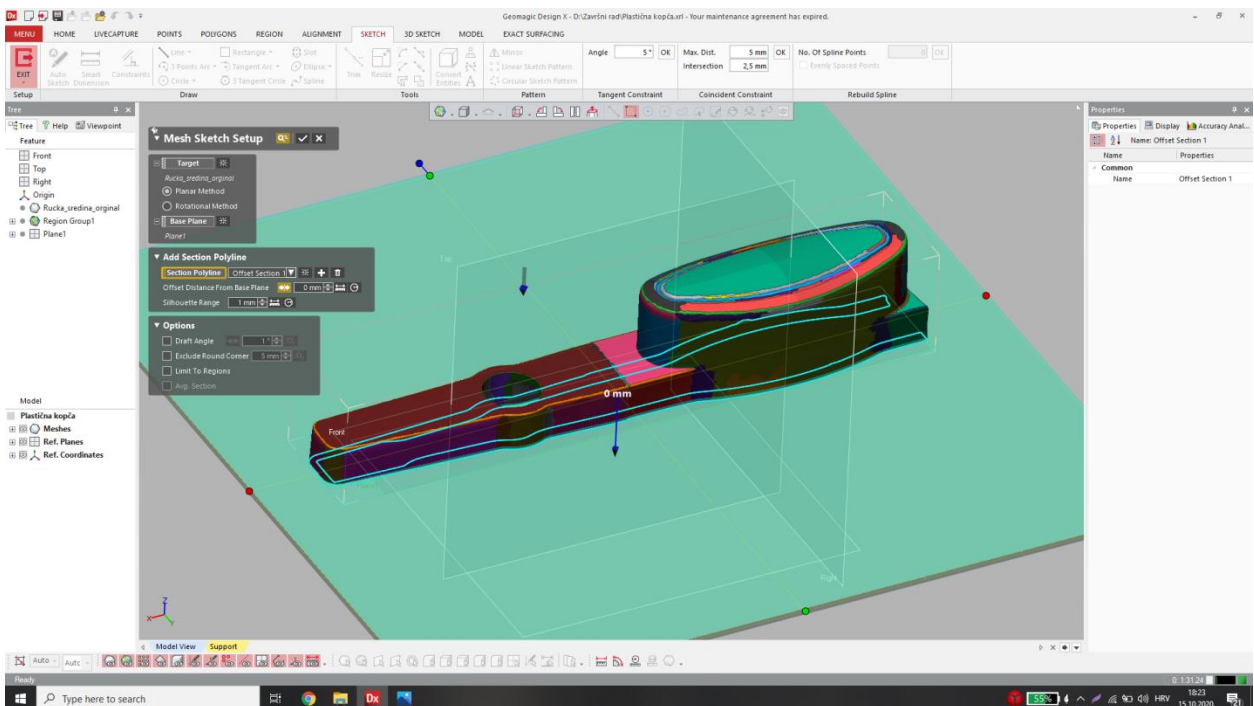
Slika 3.2: Postupak poravnanja.

Na slici 3.3 se može vidjeti kako je *mesh* kopče poravnan u odnosu na tri glavne ravnine te novostvoreni koordinatni sustav. Stvara se nova ravnina na donjoj plohi kopče i koristi se opcija „*Mesh Sketch*“ za dobivanje nacrt. „*Mesh Sketch*“ opcija uzima jedan presjek ili raspon u

mesh-u te projicira presjek na odabranu ravninu. Odabire se ravninska metoda i raspon siluete od jednog milimetra kao što je vidljivo na slici 3.4.

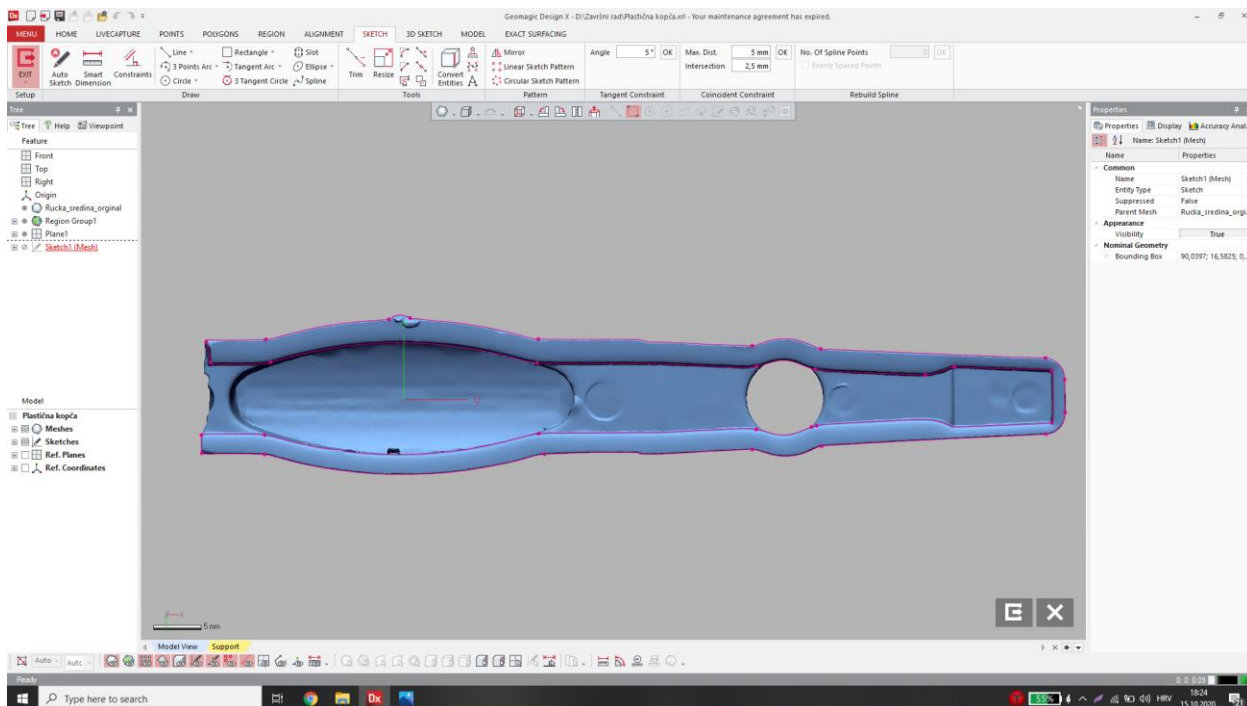


Slika 3.3: *Mesh* kopče u koordinatnom sustavu.

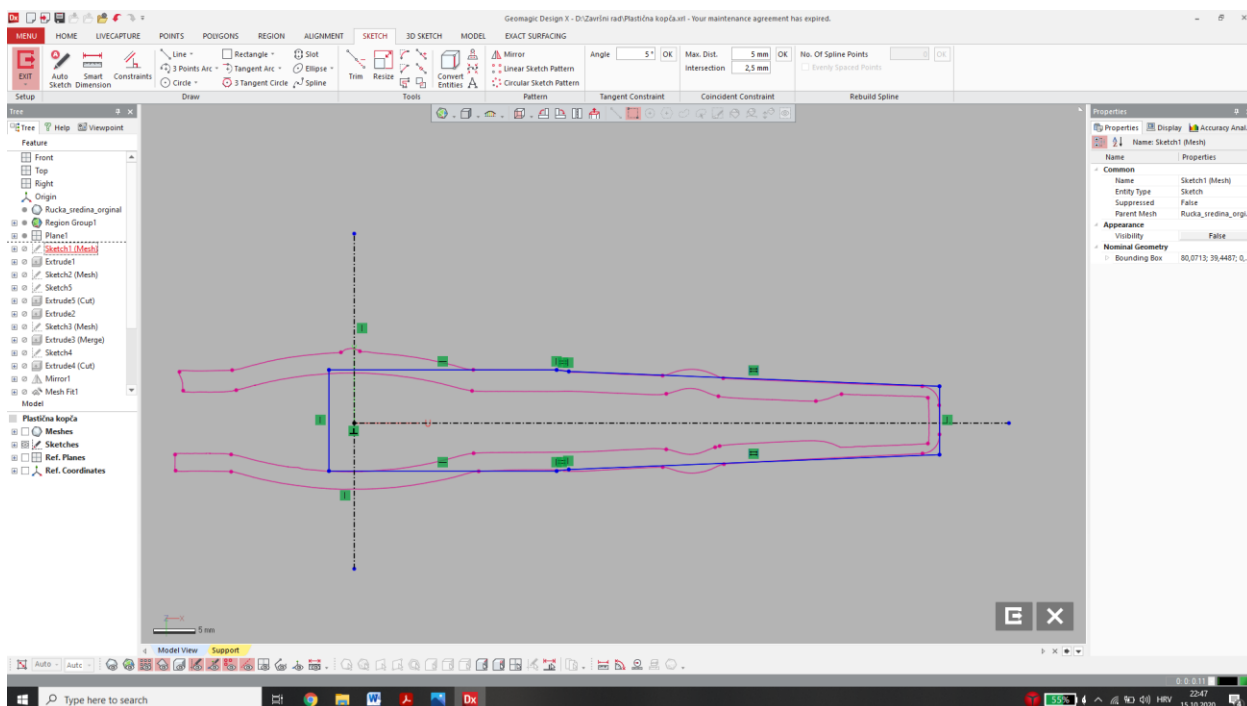


Slika 3.4: „*Mesh Sketch*“ postupak.

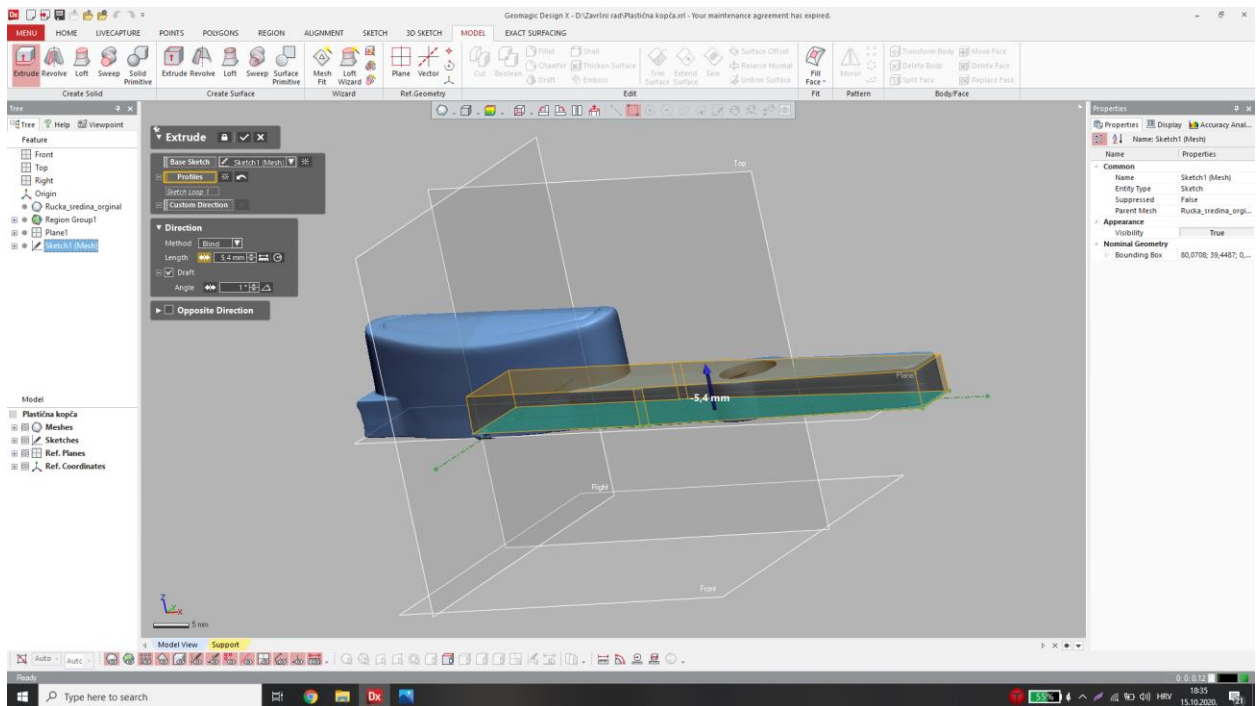
U nastavku se izradi nacrt koji se zatim ekstrudira uz kut skošenja od 1° (slike 3.5, 3.6 i 3.7).



Slika 3.5: Dobiveni presjek na ravni.

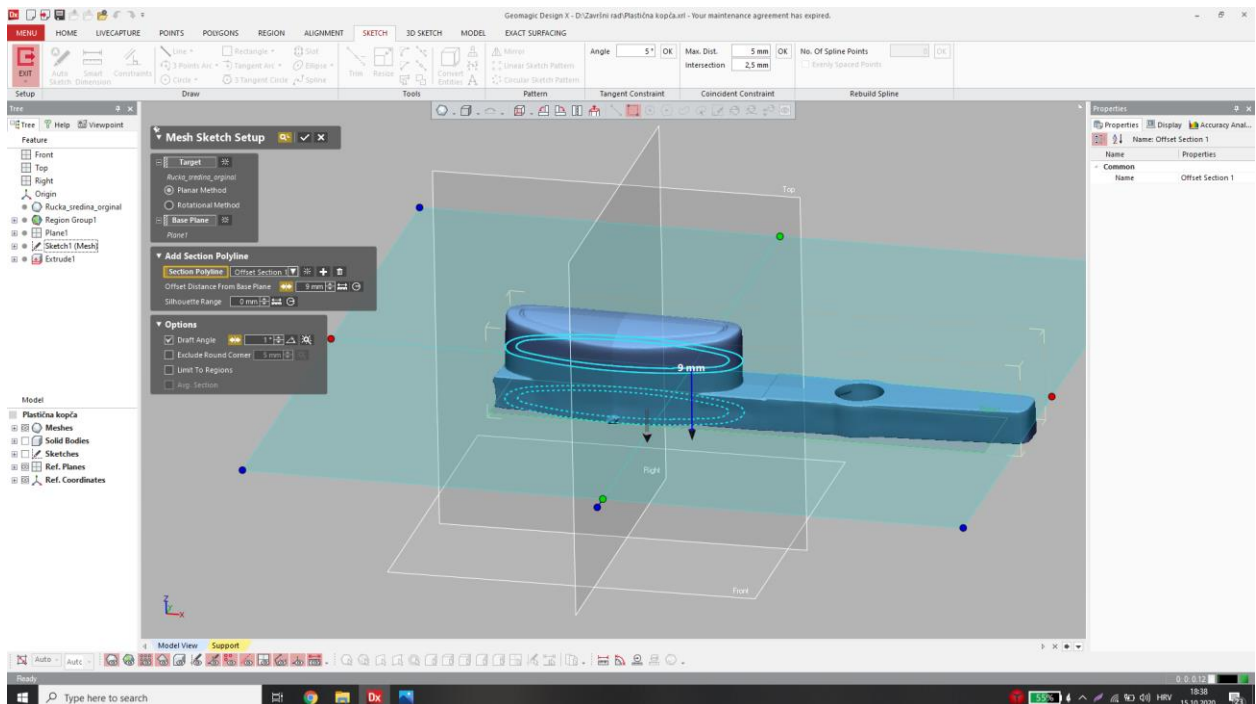


Slika 3.6: Nacrt kraja plastične kopče.

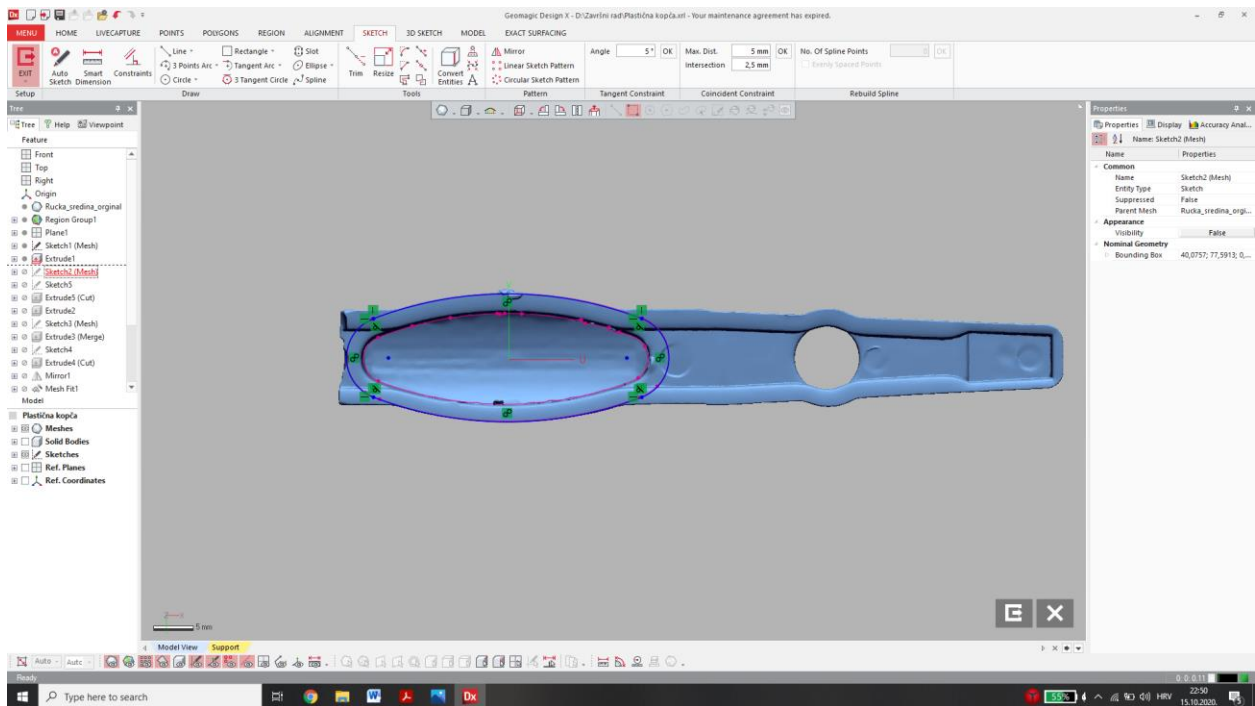


Slika 3.7: Ekstrudiranje nacrtu u *solid*.

Postupak se ponavlja za područje gumba na kopči s opcijom „*Mesh Sketch*“ i projekcijom presjeka na donju ravninu uz kut skošenja od 1° (slike 3.8 i 3.9).

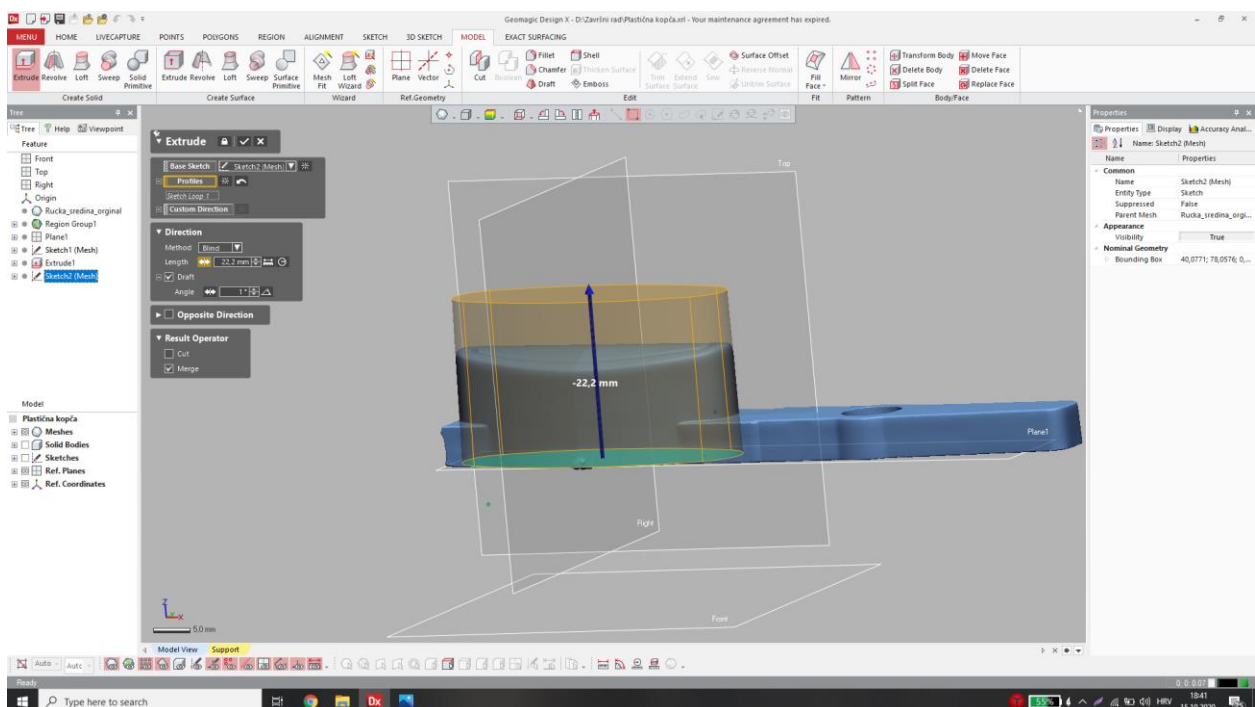


Slika 3.8: „*Mesh Sketch*“ postupak na gumbu.

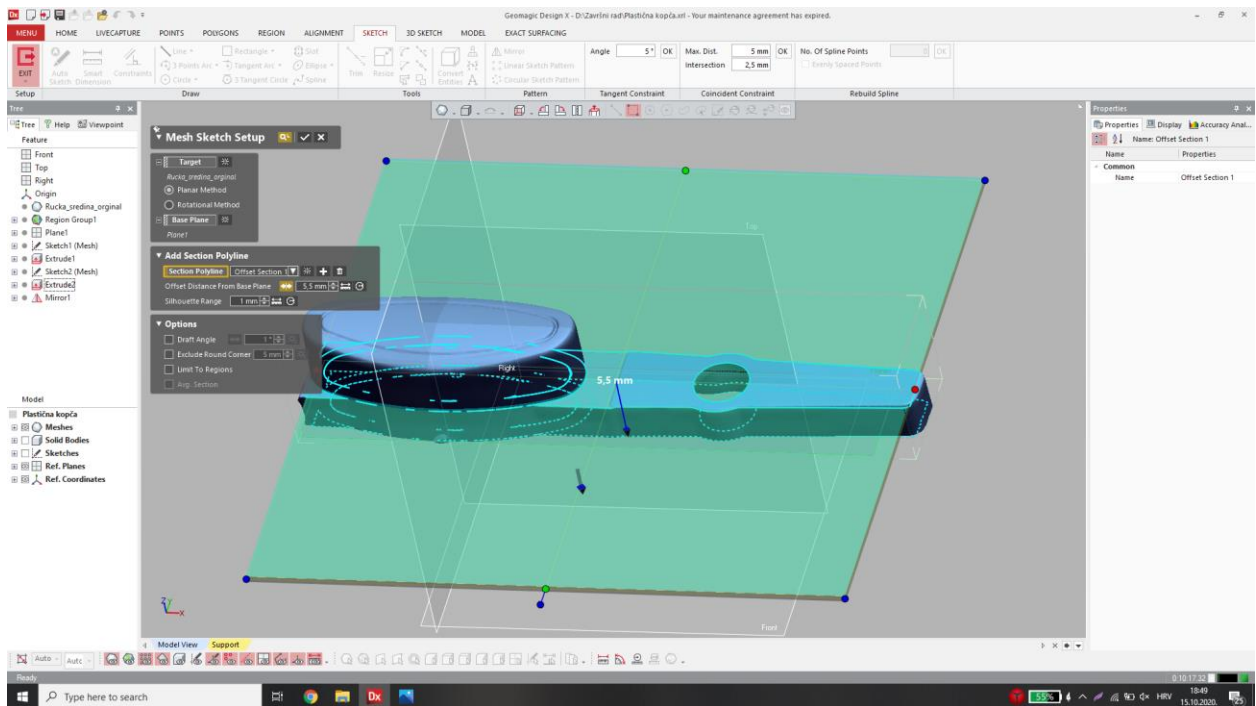


Slika 3.9: Nacrt gumba.

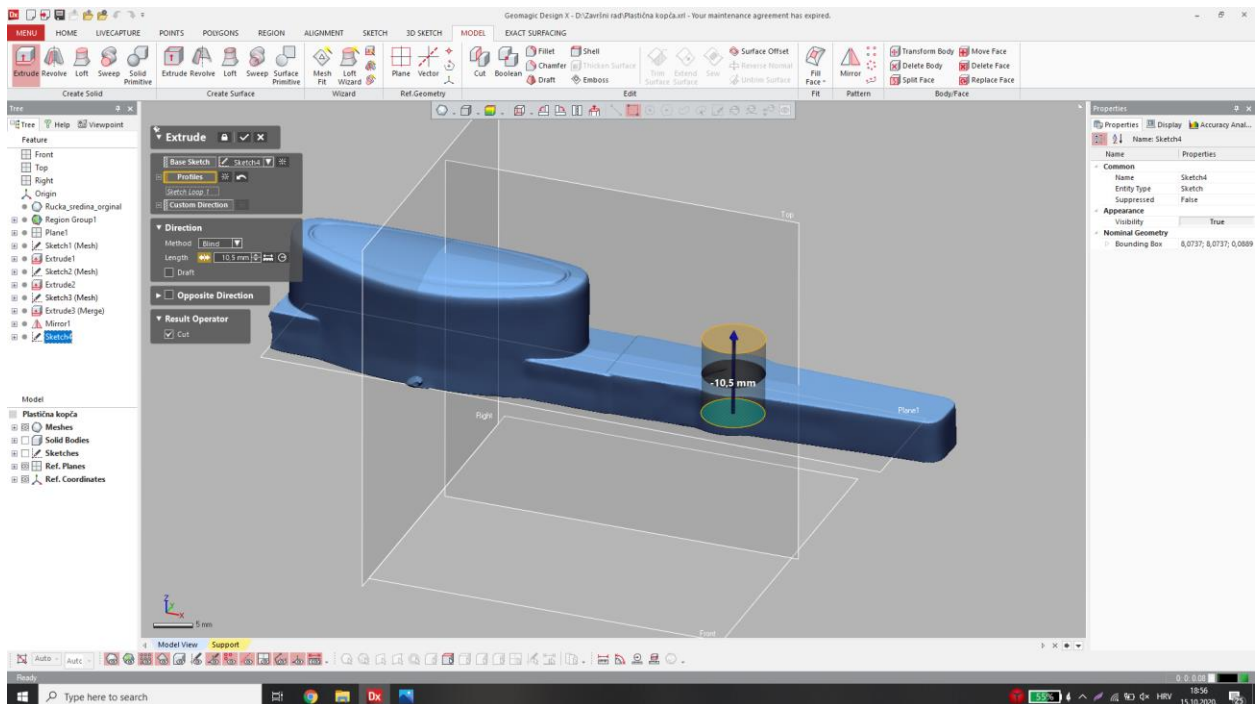
Uređen nacrt se zatim ekstrudira uz kut skošenja od 1° što se vidi na slici 3.10. Postupak se ponavlja i za kružne presjeke na sredini kopče, vanjski krug se ekstrudira dok se unutarnjim krugom urezuje rupu (slike 3.11 i 3.12).



Slika 3.10: Ekstrudiranje gumba u solid.

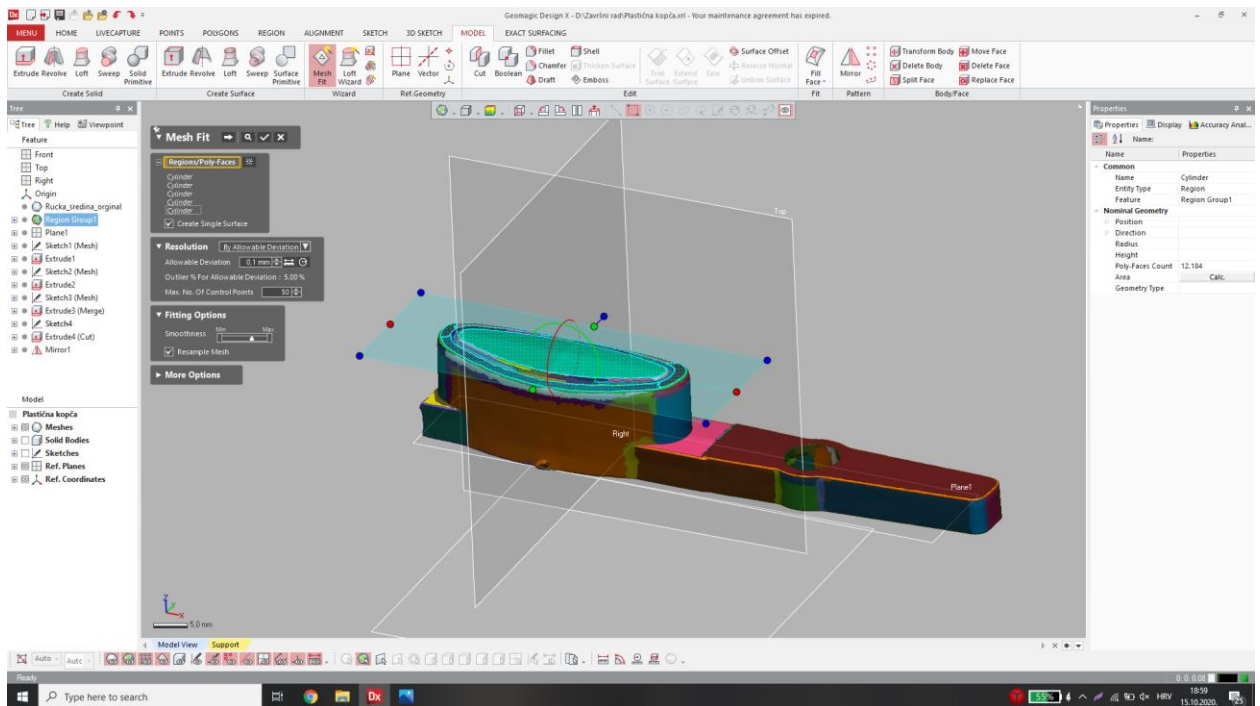


Slika 3.11: „Mesh Sketch“ postupak za kružne presjeke.

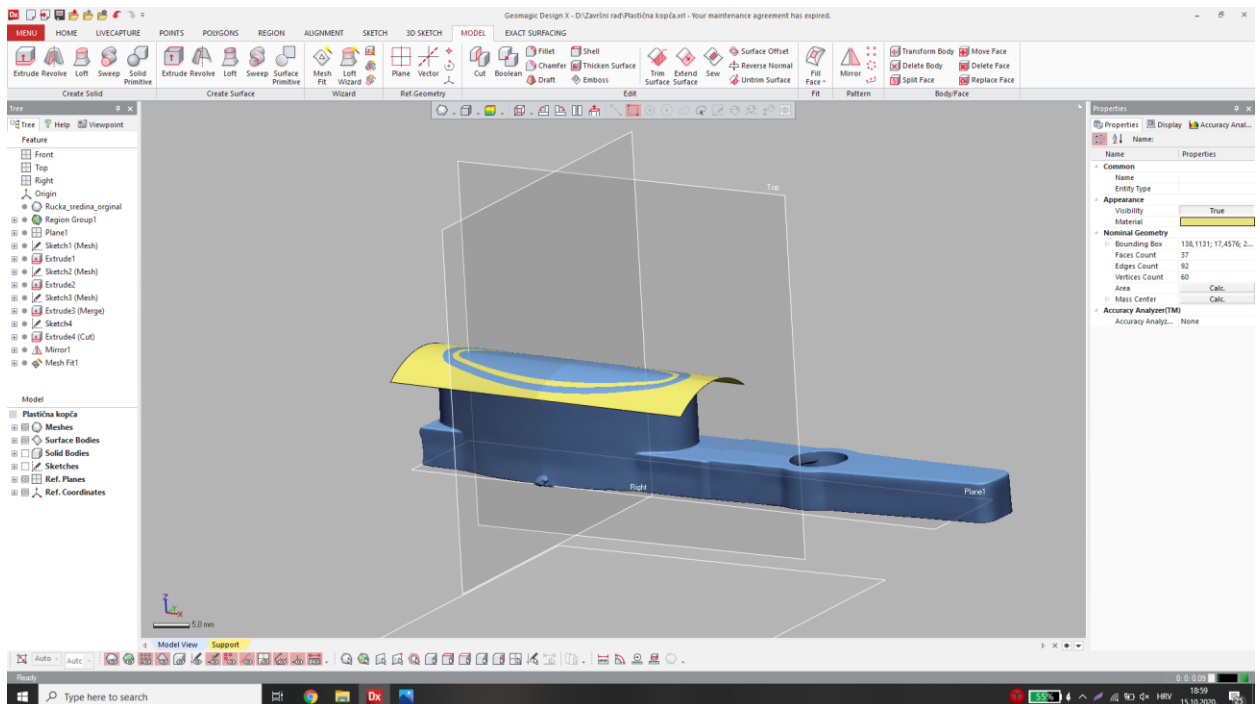


Slika 3.12: Izrezivanje rupe na kopči.

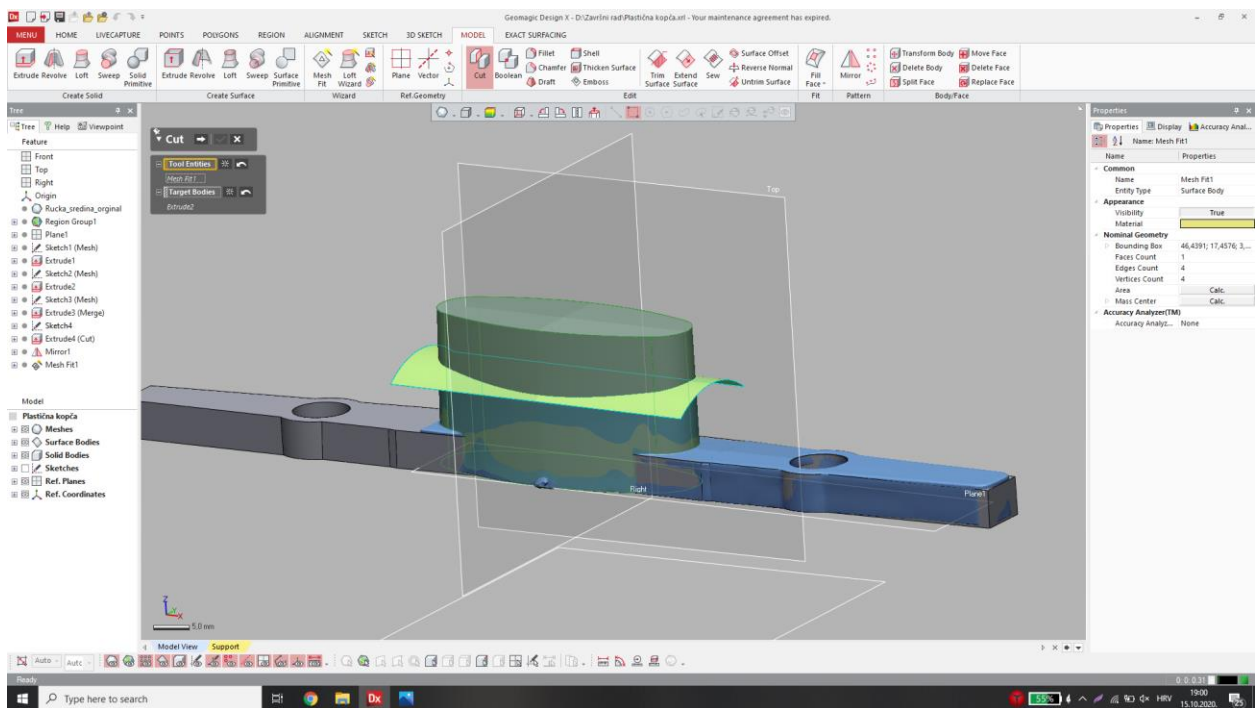
Sljedeća opcija koja se koristi je „Mesh Fit“. „Mesh Fit“ se koristi na gornjoj plohi gumba, ova opcija stvara površinu na temelju odabranih regija *mesh-a* (slike 3.13 i 3.14). Zatim se pomoću dobivene površine izrezuje oblik gornje plohe gumba kopče kao što se vidi na slici 3.15.



Slika 3.13: Postupak „Mesh Fit“ na gornjoj površini gumba.

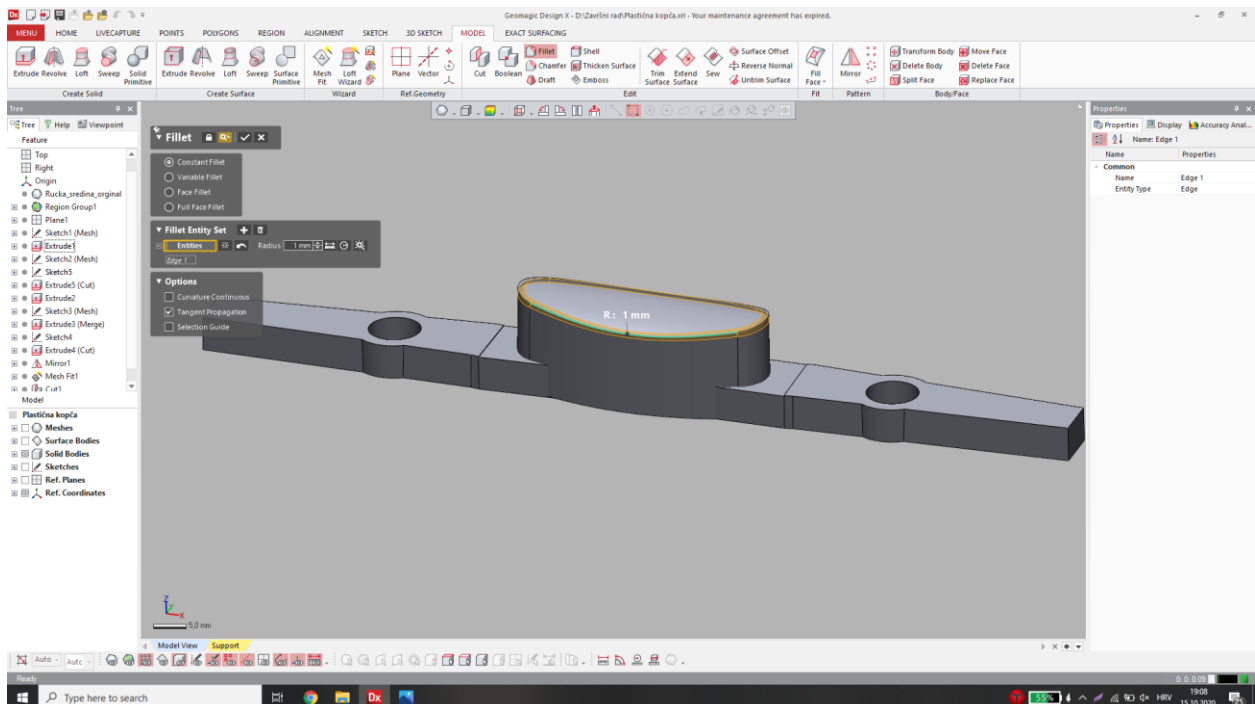


Slika 3.14: Dobivena površina nakon „Mesh Fit“ postupka.



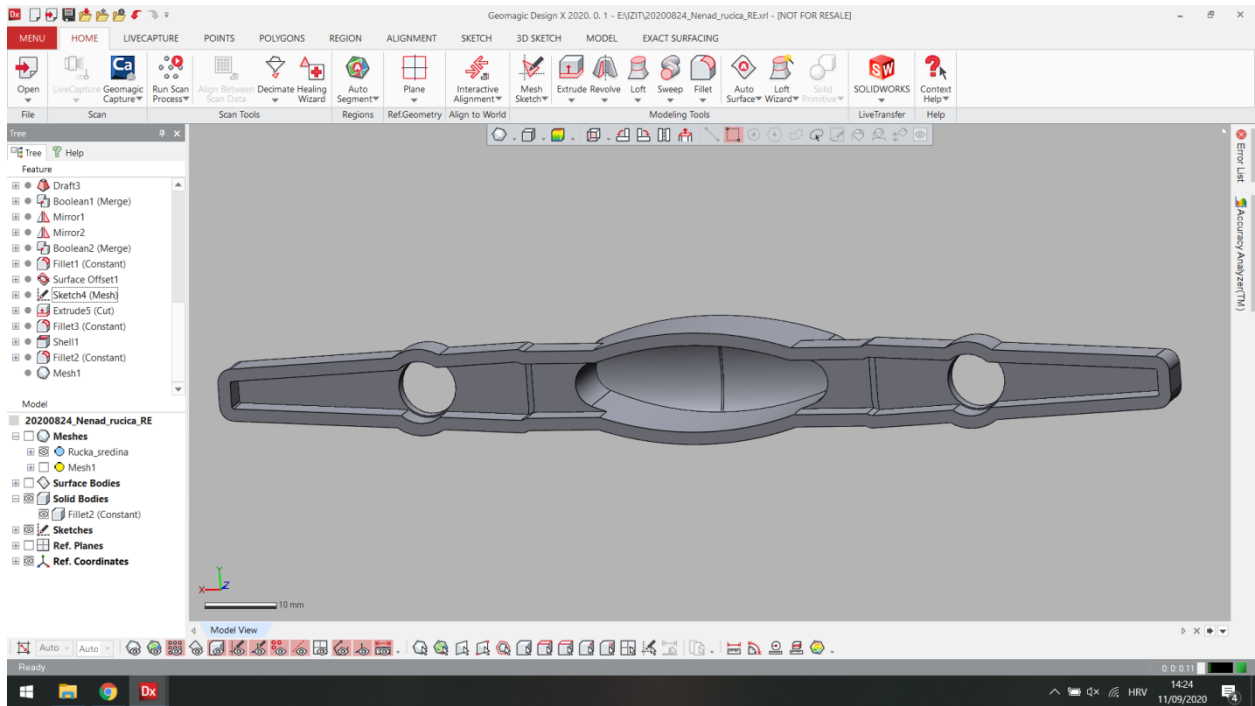
Slika 3.15: Rezanje viška *solida* pomoću dobivene površine.

Sve što je ostalo za modelirati je simetrično zrcaljenje kraja kopče preko ravnine koja sječe gumb i zaobljavanje rubova cijele plastične kopče (slika 3.16).



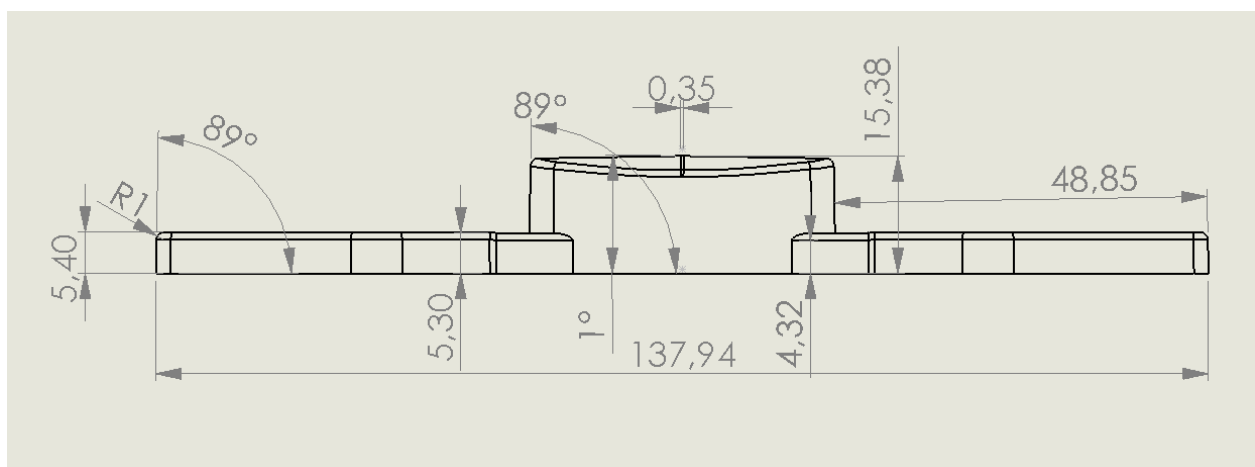
Slika 3.16: Prikaz postupka zaobljavanja rubova nakon zrcaljenja na dobivenom CAD modelu.

Za kraj je još potrebno upotrijebiti opciju „Shell“ koja će stvoriti ljusku od dobivenog 3D modela. Odabrana debljina stijenke je 1,75 milimetara, a donja ploha će biti otvorena što je vidljivo na slici 3.17. Ovakav 3D CAD model se može spremiti u više oblika, poput STL-a, STEP-a, IGES-a, ACIS-a i ostalih.

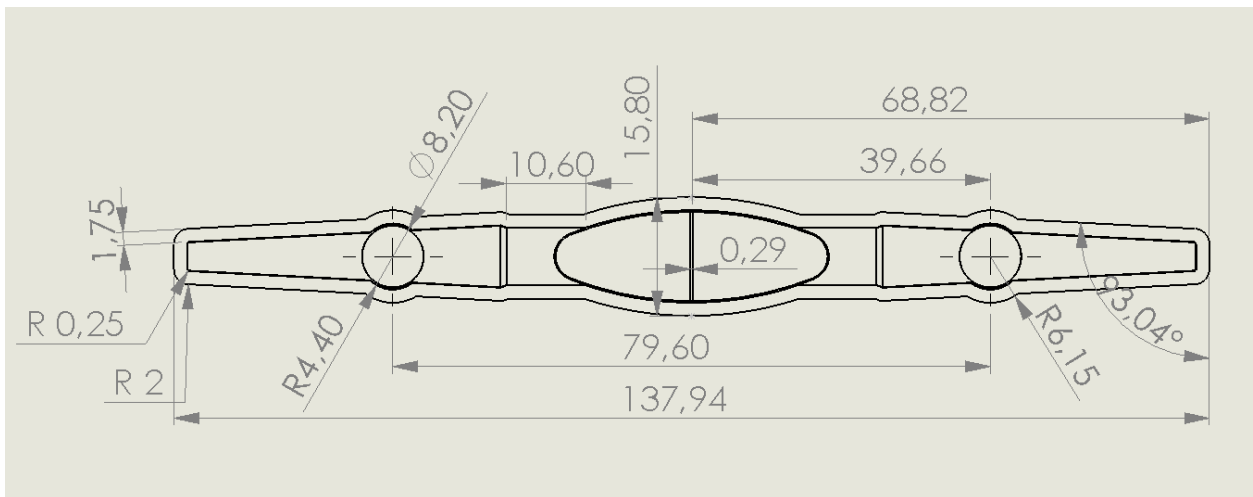


Slika 3.17: Završen 3D CAD model plastične kopče.

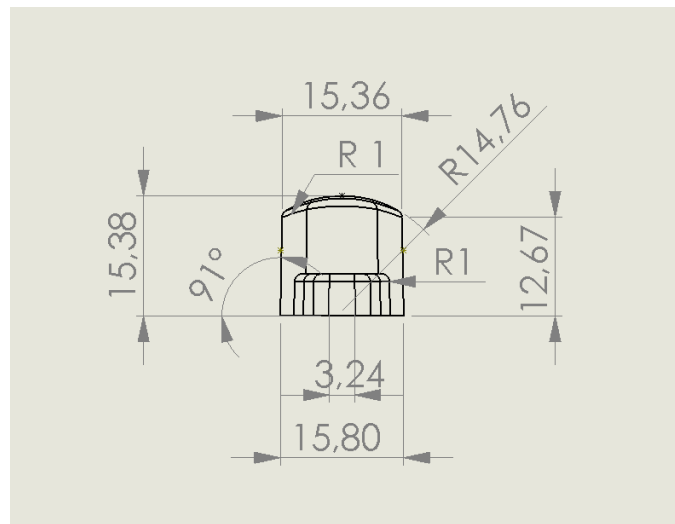
Na slikama 3.18, 3.19 i 3.20 se nalaze nacrt, tlocrt i bokocrt s dimenzijama završenog 3D CAD modela.



Slika 3.18: Nacrt CAD modela kopče ručke s dimenzijama.

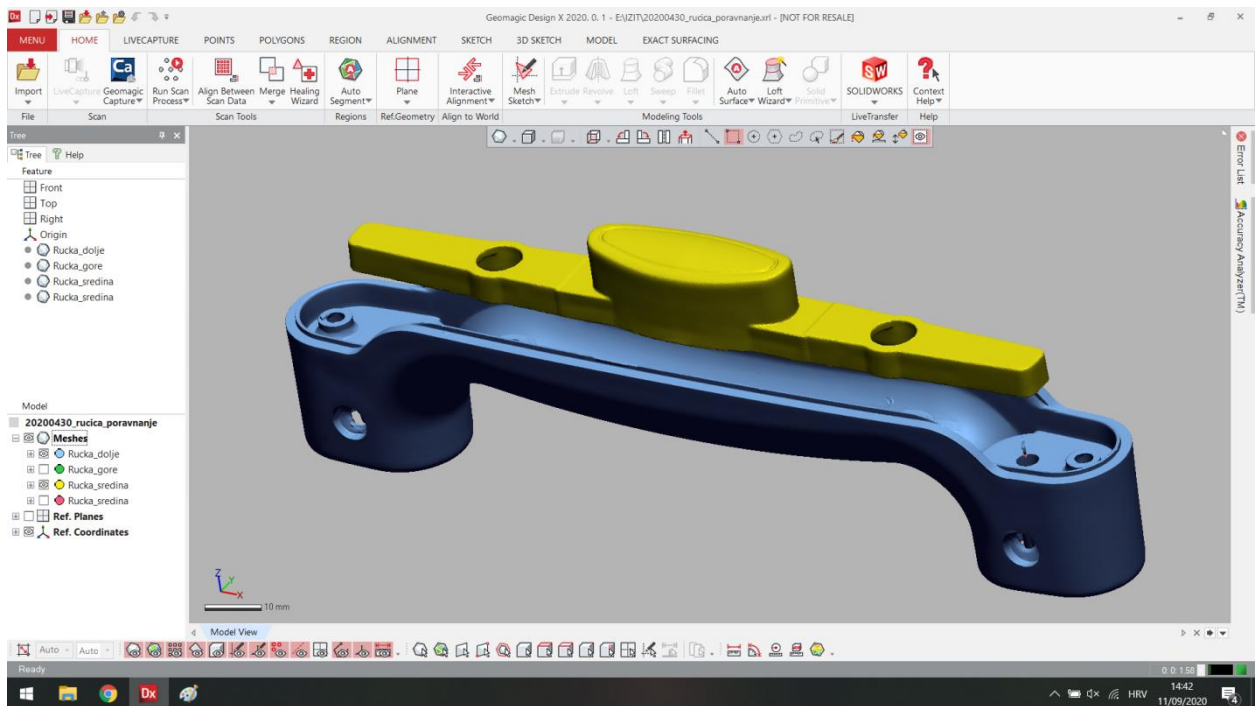


Slika 3.19: Tlocrt CAD modela kopče ručke s dimenzijama.

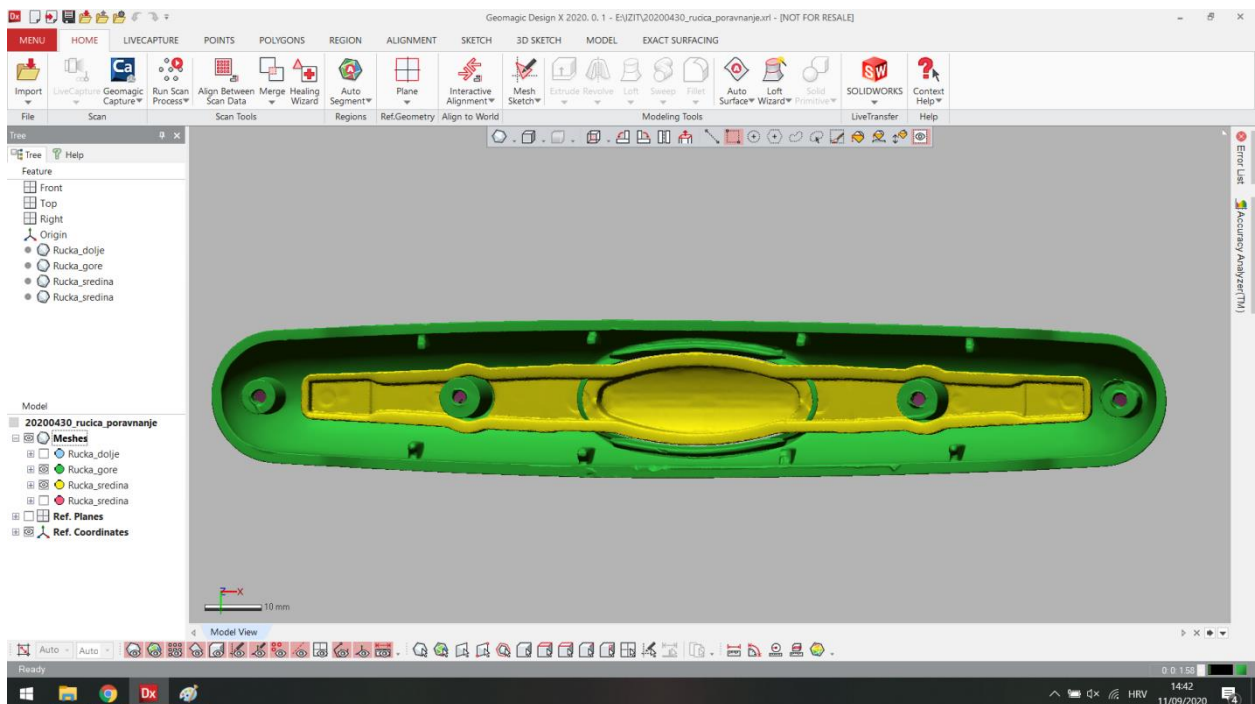


Slika 3.20: Bokocrt CAD modela kopče ručke s dimenzijama.

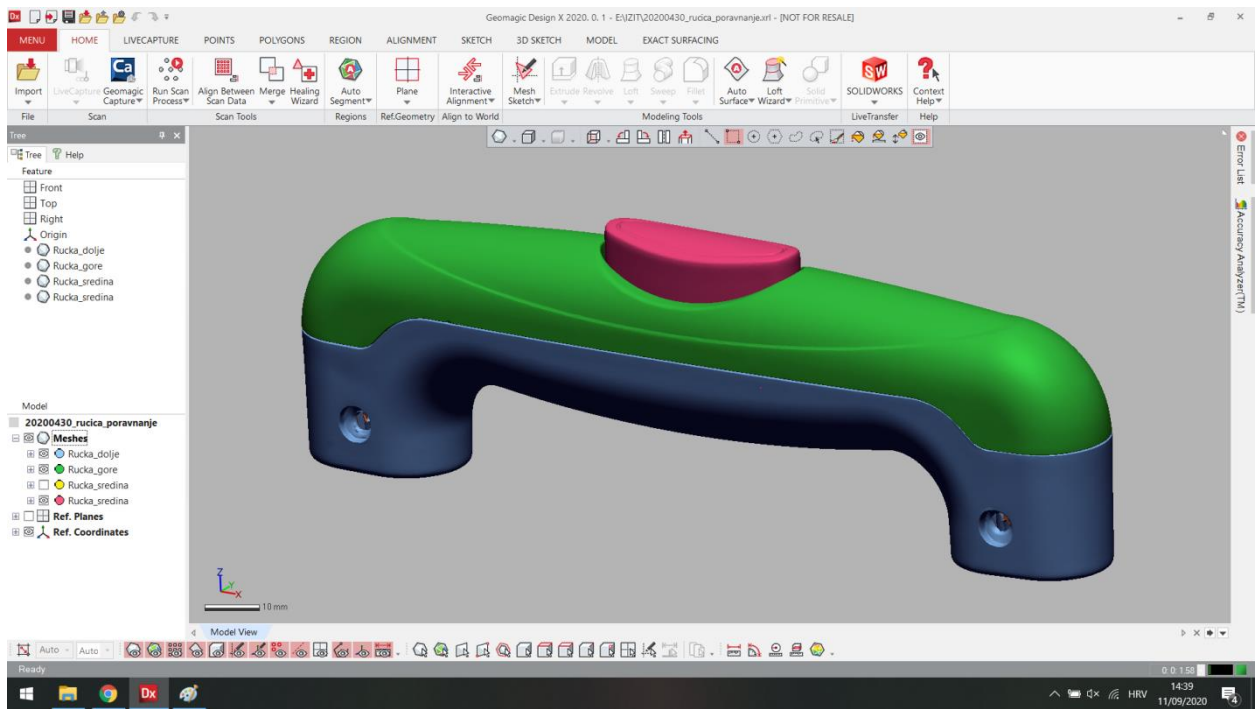
Na sljedeća tri prikaza (slike 3.21, 3.22 i 3.23) se može vidjeti kako bi se plastična kopča trebala uklapati u sklop ručke. Gornji i donji dio ručke su također skenirani optičkim 3D skenerom i poligonizirani u *mesh-ove*. STL-ovi su otvoreni u programu Geomagic Design X i korišteni samo za 3D prikaz izgleda cijelog sklopa ručke ručne prtljage.



Slika 3.21: Prikaz *mesh-a* donjeg dijela ručke i plastične kopče.



Slika 3.22: Prikaz gornjeg dijela ručke i plastične kopče.



Slika 3.23: Prikaz cijelog spojenog sklopa gornje i donje ručke s plastičnom kopčom za potrebe vizualizacije.

4. 3D ISPIS

3D ispisivanje, aditivna proizvodnja ili kolokvijalno poznatije kao 3D printanje je postupak aditivne tehnologije u kojem se stvara trodimenzionalni kruti objekt iz digitalnog oblika. 3D ispisani objekt nastaje uzastopnim taloženjem slojeva čestica materijala, odnosno tankih poprečnih presjeka tog istog objekta [9].

Termini aditivna proizvodnja i tehnologija dolaze od engleskih riječi „*add, adding*“ značenja dodati, dodavati, što je način proizvodnje dodavanjem materijala. To je moderniji i drugačiji pristup proizvodnji od standardnih procesa poput tehnologija odvajanja čestica materijala. Ova tehnologija ima vrlo visoku iskoristivost materijala, koristi se samo onoliko materijala koliko je potrebno da bi se oblikovao i izgradio predmet. Materijal koji bude višak ili otpadni materijal je u većini slučajeva moguće reciklirati i ponovno iskoristiti u aditivnoj proizvodnji.

Prvi komercijalni 3D pisac SLA-1 je proizveden 1986. godine i radio je na principu stereolitografije. Nositelj patenta za tehnologiju stereolitografije je Chuck Hull, osnivač tvrtke 3D Systems. Osim te inovacije, njegov doprinos svijetu aditivnih tehnologija je i razvoj STL formata datoteka [10].

Postoji više različitih tehnologija 3D ispisivanja, ovisno o upotrijebljenim materijalima, njihovom agregatnom stanju te obliku. Materijali potrebni za aditivnu proizvodnju su tekućeg i krutog agregatnog stanja te mogu biti u praškastom obliku.

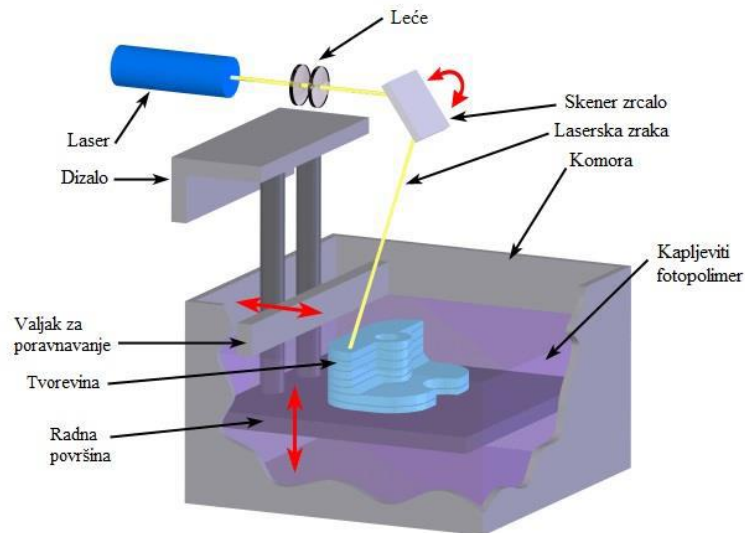
Najčešće komercijalno isplative aditivne tehnologije danas su:

1. Stereolitografija (SLA)
2. Selektivno lasersko srašćivanje (SLS)
3. 3D tiskanje (3DP)
4. Proizvodnja laminarnih objekata (LOM)
5. Ispisivanje mlazom fotopolimera (PolyJet)
6. Izravno taloženje metala laserom (LENS)
7. Direktno lasersko sinteriranje metala (DMLS)
8. Taložno očvršćivanje (FDM/FFF)

Za potrebe završnog rada korišten je 3D pisac koji koristi FDM/FFF (engl. *Fused deposition modeling / Fused filament fabrication*) tehnologiju, stoga će ta tehnologija biti detaljnije obrađena. U nastavku su kratki opisi ostalih navedenih aditivnih tehnologija koje 3D pisaci koriste. Osim ovih tehnologija postoje još mnoge koje imaju vrlo sličan princip rada uz različite modifikacije i iteracije te se neće spominjati u ovom radu.

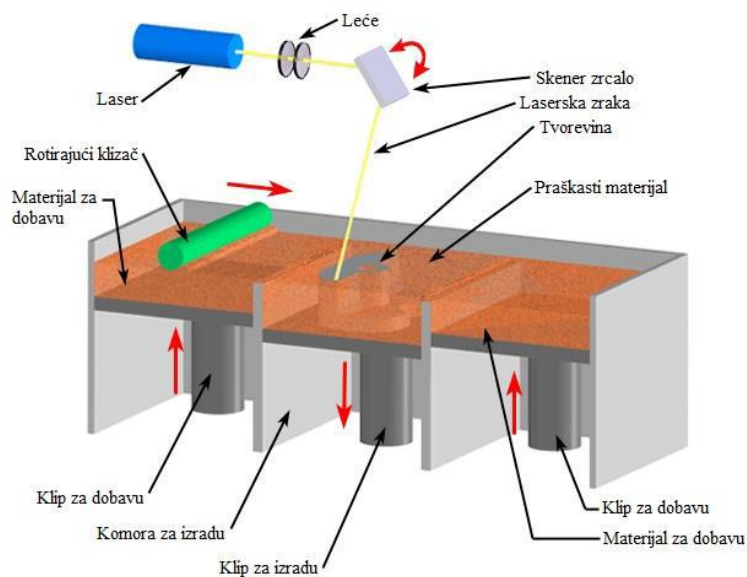
4.1. Vrste aditivnih tehnologija

Stereolitografija (engl. *Stereolithography - SLA*) je postupak aditivne tehnologije koji koristi tekući fotopolimer za izgradnju slojeva. Na sloj fotopolimera djeluju ultraljubičaste zrake koje ga očvršćuju i povezuju s prethodnim slojem. Kada sloj očvrstne, radna podloga se izdiže za debljinu jednog sloja te se postupak očvršćivanja ponavlja do konačne izgradnje cijelog predmeta (slika 4.1) [11].



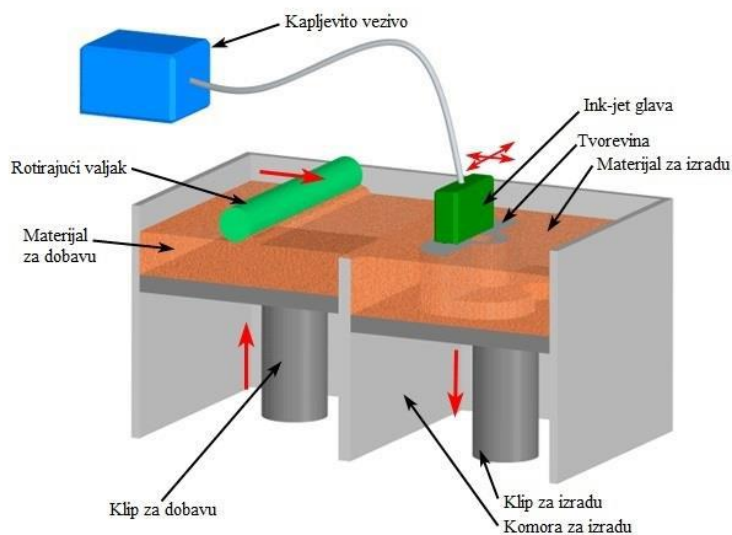
Slika 4.1: SLA tehnologija [11].

Selektivno lasersko srašćivanje (engl. *Selective laser sintering - SLS*) za izradu koristi materijal u praškastom obliku. Laserska zraka je usmjerena prema prašku kojeg zbog utjecaja visoke temperature grupira u krutinu. Laserska zraka opisuje na podlozi s praškom presjek modela te se zatim radna podloga spušta za debljinu sloja. Rotirajući valjak nanosi novi sloj materijala a laserska zraka sinterira novi sloj koji se spaja s prethodnim te se postupak ponavlja do kraja izgradnje objekta (slika 4.2) [11].



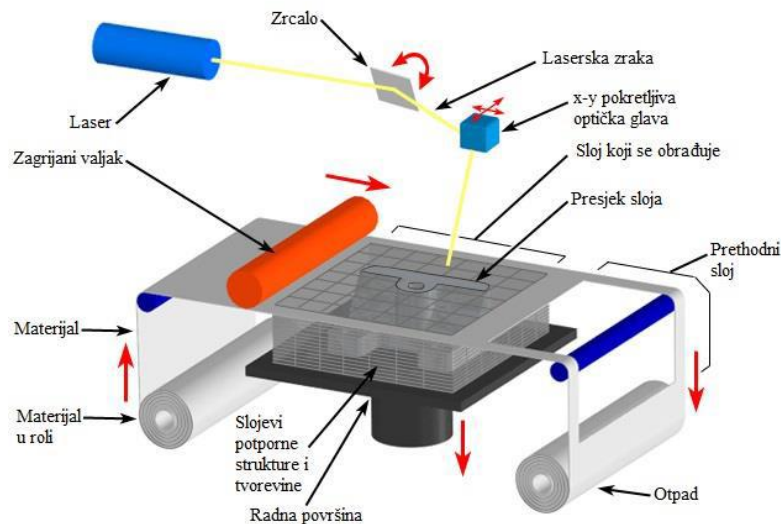
Slika 4.2: SLS tehnologija [11].

3D tiskanje (engl. *3D printing* – *3DP*) se izvodi u zagrijanoj komori ispunjenoj praškastim materijalom. Materijal se nanosi rotirajućim valjkom, glava pisara raspršuje ljepilo ili vezivo koje povezuje praškasti materijal. Valjci nanose jednu debljinu sloja na postojeći te se postupak ponavlja dok se ne dobije gotov proizvod. Proizvodu je naknadno potrebno dodati još veziva da bi mu se povećala čvrstoća (slika 4.3) [11].



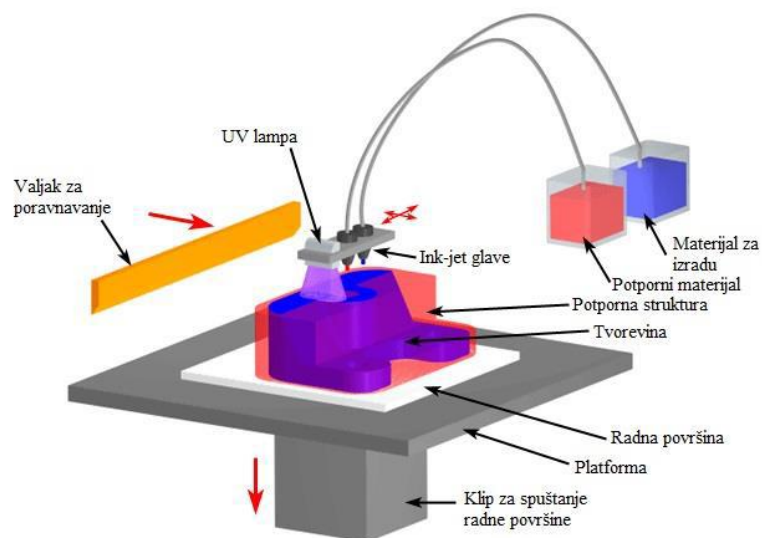
Slika 4.3: 3DP tehnologija [11].

Proizvodnja laminarnih objekata (engl. *Laminated object manufacturing - LOM*) za materijal koristi polimernu foliju, metal, papir ili kompozitne materijale. Valjak na radnu površinu dovodi materijal te u nekim slučajevima dodatno vezivo. Laserska zraka izreže oblik na materijalu i tako stvori sloj a zagrijani valjak zatim pritisne postojeći sloj i time poveže slojeve. Radna podloga se zatim spušta za debljinu sloja i postupak se ponavlja dok se ne dobije konačan oblik (slika 4.4) [11].



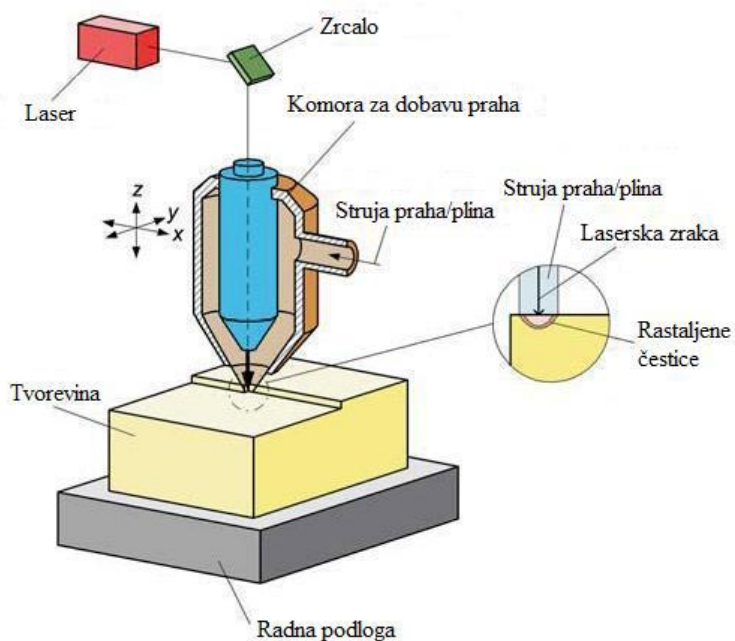
Slika 4.4: LOM tehnologija [11].

Ispisivanje mlazom fotopolimera (engl. *PolyJet*) je tehnologija koja istiskuje fotopolimerni materijal pomoću dvije glave s nekoliko stotina mlaznica. Glave s mlaznicama istovremeno istiskuju građevni materijal i materijal za potporu. Ultraljubičaste zrake zatim skrućuju fotopolimer i time stvaraju tanak sloj. Radna površina se zatim spušta za debljinu sloja, mlaznice istiskuju fotopolimer u obliku sljedećeg presjeka a ultraljubičaste zrake spajaju slojeve u jednu cjelinu te se tako ponavlja postupak do kraja izrade (slika 4.5) [11].



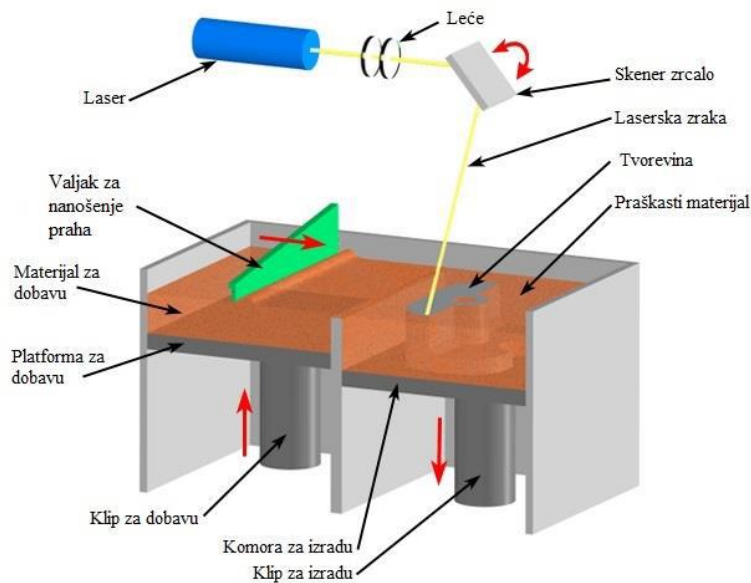
Slika 4.5: PolyJet tehnologija [11].

Izravno taloženje metala laserom (engl. *Laser engineered net shaping - LENS*) koristi metalne legure u praškastom obliku i keramiku za izradu proizvoda. Točno određena količina metalnog praha se ubrizgava pomoću mlaznica u fokus laserske zrake. Laserska zraka tali metalni prah i tako stvara sloj. Na novostvoreni sloj se dovodi novi sloj metalnog praha, laserska zraka tali i spaja slojeve. Postupak se izvodi do kraja oblikovanja predmeta (slika 4.6) [11].



Slika 4.6: LENS tehnologija [11].

Direktno lasersko sinteriranje metala (engl. *Direct metal laser sintering* - *DMLS*) je prvi komercijalni postupak izrade metalnih dijelova pomoću aditivne tehnologije. Materijal koji se koristi za izradu je metal u praškastom obliku. Postupak započinje nanošenjem metalnog praha na radnu površinu. Laserska zraka opisuje oblik presjeka po prahu te ga tali i spaja u kruti sloj. Radna površina se spušta za debljinu sloja te zatim valjak nanosi novi sloj materijala na postojeći. Laserska zraka ponavlja postupak te time spaja slojeve. Postupak se izvodi u komori koja je pod tlakom do kraja izrade predmeta (slika 4.7) [11].



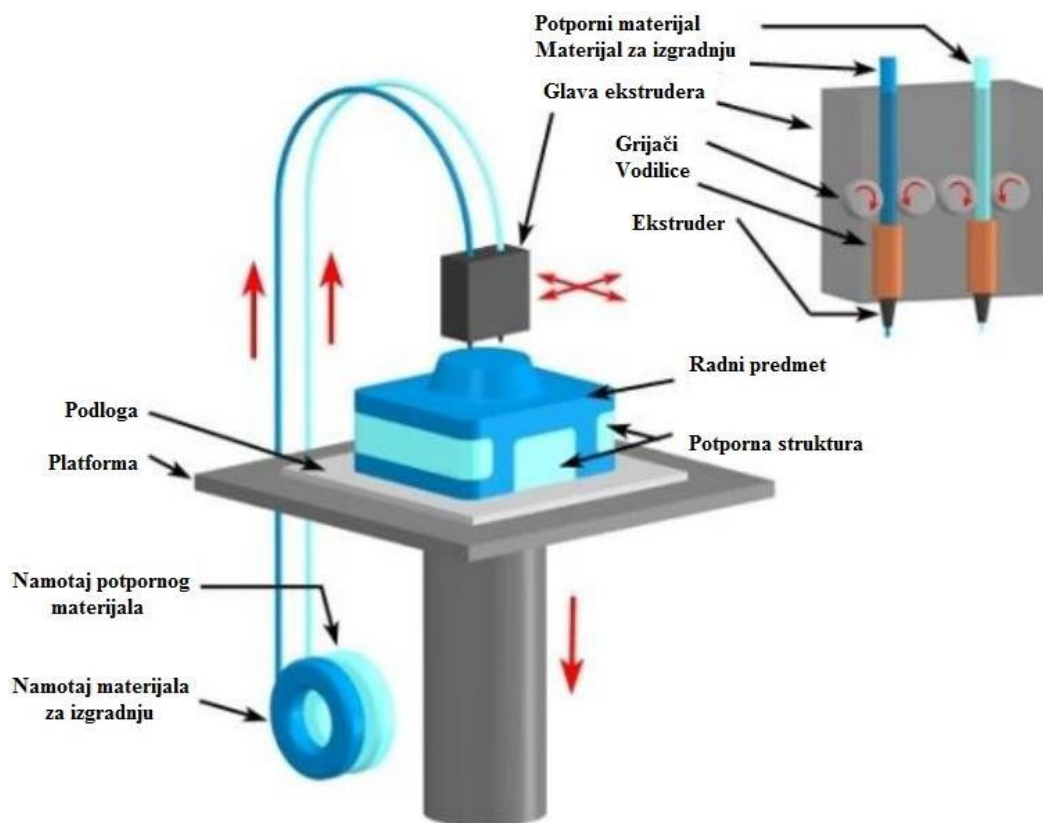
Slika 4.7: DMLS tehnologija [11].

4.2. FDM/FFF tehnologija

Za ispisivanje plastičnih kopči ručke ručne prtljage korišten je Zortrax M200 3D pisac koji koristi LPD (engl. *Layer plastic deposition*) tehnologiju ispisivanja. LPD tehnologija je Zortrax-ova inačica FDM/FFF (engl. *Fused deposition modeling / Fused filament fabrication*) tehnologije aditivne proizvodnje te će se u nastavku koristiti samo termin FDM. FDM tehnologiju je 1988. godine izumio S. Scott Crump, jedan od osnivača tvrtke Stratasys. Naziv FDM je vlasništvo američke tvrtke Stratasys, a patent na ovu tehnologiju je istekao 2009. godine te se od tada ova tehnologija počinje razvijati brže nego ikada prije. Kako se je ova tehnologija počela naglo razvijati, tako je postajala jeftinija i dostupnija širem broju ljudi te je trenutno najraširenija aditivna tehnologija u svijetu.

FDM tehnologija aditivne proizvodnje koristi polimerne materijale u obliku niti namotanih na koluture koji se nazivaju filamenti. Filamenti se pomoću zupčanika u glavi ekstrudera uvlače te ih grijači glave omekšavaju. Tako omekšani filament prolazi kroz mlaznicu glave (najčešći promjer mlaznice je 0,40 milimetara) i prianja na radnu podlogu. Kada glava ekstrudera opiše oblik presjeka tijela na radnoj podlozi, podiže se za jednu debljinu sloja i nastavlja taložiti slojeve na prethodno istisnute slojeve. Postoje i 3D pisači kod kojih se radna podloga spušta za debljinu sloja, a glava pisača ostaje na istoj visini. Netom istisnuti slojevi se spajaju te se na sobnoj temperaturi hlade i ukrućuju. Postupak dodavanja slojeva omekšanog polimera se ponavlja sve dok proizvod nije gotov (slika 4.8).

Radna podloga kod FDM 3D pisača može biti grijana. Grijane podloge pomažu kod problema uvijanja prvih slojeva polimera zbog nepravilnog hlađenja različitih slojeva kao što se događa na negrijanim podlogama. Postoje 3D pisači koji imaju više od jedne glave ekstrudera. U većini slučajeva jedna glava služi za ispisivanje građevnog materijal dok druga za potporni materijal. Takve slične verzije 3D pisača mogu izrađivati dvobojne ili višebojne predmete. Najkorišteniji materijali za 3D ispisivanje FDM tehnologijom su PLA (engl. *Polylactic acid*), ASA (engl. *Acrylic styrene acrylonitrile*), ABS (engl. *Acrylonitrile butadiene styrene*) i PETG (engl. *Polyethylene terephthalate glycol*).



Slika 4.8: FDM/FFF tehnologija [12].

4.2.1. Zortrax M200 3D pisač

Poljska tvrtka Zortrax proizvodi M200 stolne 3D pisače koji koriste LPD/FDM tehnologiju za aditivnu proizvodnju. Ovaj 3D pisač je korišten za proizvodnju svih plastičnih kopči potrebnih za statička i dinamička testiranja.

M200 pisač ima jednu ekstrudersku glavu koju koristi za ispisivanje i građevnog i potpornog materijala. Ima grijanu radnu podlogu koja pomaže da prvi nataloženi slojevi dobro prijanjaju na površinu podloge.

Detaljnija specifikacija ovog 3D pisača se može vidjeti u tablici 4.1.

Tablica 4.1: Specifikacija 3D pisača Zortrax M200 [13].

Dimenzije pisača s kolotutom [mm]	350 x 440 x 505
Dimenzije pisača bez kolotura [mm]	350 x 360 x 505
Masa [kg]	18
Rezolucija sloja [mm]	0,09 – 0,39
Minimalna debljina zida [mm]	0,45
Radni volumen [mm]	200 x 200 x 180
Promjer materijala [mm]	1,75
Promjer mlaznice [mm]	0,40
Maksimalna temperatura ispisa [°C]	290
Maksimalna temperatura podloge [°C]	105
Dostupni materijali za ispis	9 materijala: Z-ABS, Z-ABS 2, Z-ASA Pro, Z-ULTRAT, Z-GLASS, Z-PCABS, Z-HIPS, Z-PETG, Z-PLA Pro



Slika 4.9: Korišteni Zortrax M200 3D pisač.

4.2.2. Korišteni polimerni materijali

Za rekonstrukciju plastične kopče ručke odabrana su tri različita polimerna materijala: Z-ABS, Z-ASA Pro te Z-ULTRAT. Sva tri materijala su originalni Zortrax filamenti s promjerom niti od 1,75 milimetara.

Z-ABS se proizvodi od ABS (engl. *Acrylonitrile butadiene styrene*) materijala. ABS je jedan od prvih proizvedenih polimera te se koristi duži niz godina u aditivnoj proizvodnji. Ima matiranu površinu koju je lako naknadno mehanički obraditi brušenjem ili kemijski pomoću acetona. ABS ima visoku temperaturu staklastog prijelaza što ga čini dobrim materijalom za podnošenje viših temperatura prije početka deformiranja. Ima dobru čvrstoću i otpornost na udarce te je vrlo jeftin u usporedbi s ostalim polimernim materijalima koji se koriste za aditivnu proizvodnju. Negativne strane su mu to što zahtijeva grijanu radnu podlogu zbog mogućnost odvajanja od podloge i vertikalnog savijanja te otpuštanje mirisa prilikom zagrijavanja materijala [14, 15].

Z-ASA Pro materijal se proizvodi od ASA (engl. *Acrylic styrene acrylonitrile*) polimera. ASA materijal je razvijen s naumom da ima slična svojstva ABS-u ali da bude otporniji na vanjske utjecaje okoliša. ASA polimer je zadržao svojstva dobre čvrstoće, otpornosti na udarce te dobro podnosi promjenu temperature. Osim ovih svojstava, ASA polimeri su otporniji na ultraljubičasta zračenja, kišu, vjetar i ostale atmosferske utjecaje. Iz tog razloga, ASA materijali služe za izradu proizvoda koji će se koristiti za vanjsku primjenu. Nedostaci ovog materijala su veća cijena, potreba za većom temperaturom ekstrudiranja i otpuštanje opasnih para stirena prilikom 3D ispisivanja [14, 16].

Z-ULTRAT je ABS materijal s dodatkom polikarbonata kojeg proizvodi isključivo tvrtka Zortrax. Ovaj polimer zadržava svojstva ABS-a poput lake mehaničke i kemijske obradivosti površine, dobre čvrstoće, otpornosti na udarce i visoke temperature. Z-ULTRAT se ističe od ABS-a po svojoj dugotrajnosti, izdržljivosti i većoj tvrdoći [17].

U nastavku se nalazi tablica s usporedbom fizikalnih svojstava sva tri prethodno opisana korištena materijala (tablica 4.2).

Tablica 4.2: Usporedba fizikalnih svojstava polimernih materijala [15, 16, 17].

Materijal	Z-ABS	Z-ASA Pro	Z-ULTRAT
Vlačna čvrstoća [MPa]	30,46	24,21	32,60
Lomna čvrstoća [MPa]	25,89	21,94	30,70
Istezljivost [%]	4,52	2,64	3,78
Istezljivost pri lomu [%]	11,08	2,76	4,87
Savojna čvrstoća [MPa]	46,30	45,60	54,00
Temperatura staklastog prijelaza [°C]	107,89	80,99	106,40
Gustoća [g/cm ³]	1,195	1,176	1,179
Tvrdoća po Shore-u [D]	69,20	68,00	73,40
Udarna čvrstoća po Izodu [kJ/m ²]	8,93	3,81	5,26
Modul elastičnosti [GPa]	1,08	1,36	1,85
Cijena za 800 grama materijala [€]	43,05	54,12	54,12

4.3. Postupak 3D ispisa

3D CAD model stvoren pomoću alata za povratno inženjerstvo potrebno je spremi u STL obliku. STL datoteka modela se zatim prenosi na softverske alate koji stvaraju G naredbe na temelju modela.

G naredbe su funkcije strojnog programskog jezika za strojno upravljanje uređajima i alatima poput CNC (engl. *Computer Numerical Control*) glodalica i 3D pisača. Programski alat koji stvara G naredbe za 3D pisač se naziva „*Slicer*“. U prijevodu znači „rezač“, a ono što *slicer* radi je stvaranje (rezanje) višestrukih presjeka debljine jednog sloja po cijeloj visini 3D modela.

Slicer program koji se koristi za sve Zortrax 3D pisače, a tako i M200 3D pisač je Z-Suite. Prednost ovog *slicer* programa nad ostalima je u tome što on ima već definirane postavke ispisa za originalne Zortrax materijale potrebne za najveću kvalitetu ispisivanja.

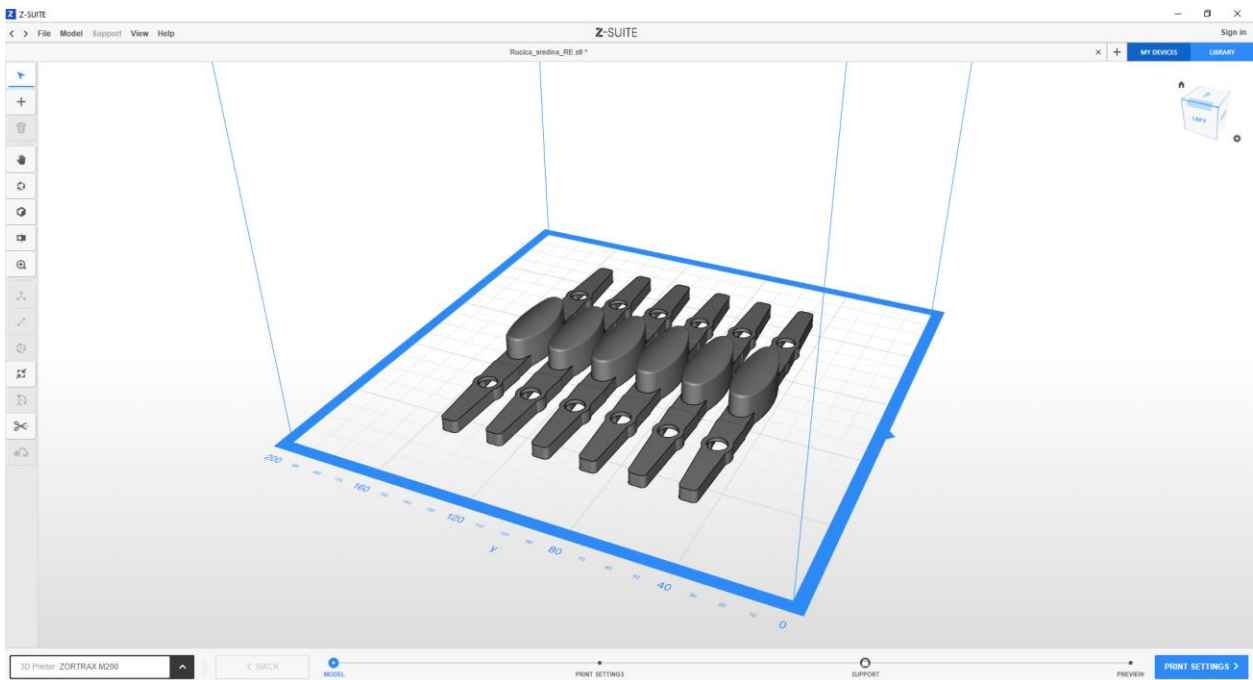
Za statička i dinamička ispitivanja kopče ručke nastale aditivnom proizvodnjom potrebno je ispisati ukupno osamnaest primjeraka kopči. Za statička ispitivanja potrebna su tri uzorka, za dinamička ispitivanja dva uzorka te za mjerenje progiba je potreban jedan primjerak kopče. Sveukupno je potrebna izrada šest primjerak od Z-ABS materijala, šest primjerak od Z-ASA Pro i šest primjerak od Z-ULTRAT polimernog materijala.

Postupak pripreme 3D ispisa započinje otvaranjem programa Z-Suite, nakon otvaranja odabire se 3D pisač koji će se koristiti, u ovom slučaju M200. Nakon stvaranja novog projekta, dodaje se STL datoteka modela kopče koji je potrebno ispisati. U radni volumen se dodaje šest primjeraka (slika 4.10). S modelima se zatim manipulira, pomiče te ih se rotira po želji kako bi se dobilo što kvalitetnije prijanjanje na podlogu i što kvalitetnija potporna struktura.

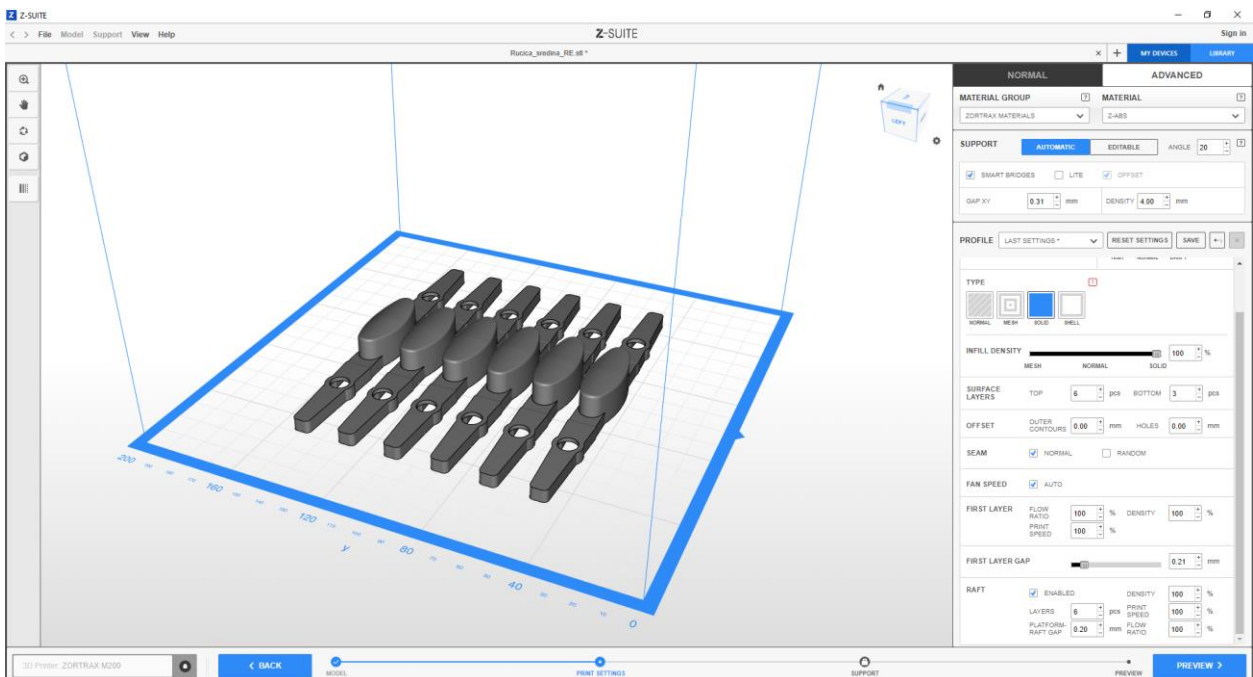
U postavkama ispisa (slika 4.11) se odabiru željeni materijali ispisa, u ovom slučaju će to biti Z-ABS, Z-ASA Pro i Z-ULTRAT. Odabire se automatsko generiranje potpornih stupova za sve kutove veće od 20 stupnjeva, najveća kvaliteta, veličina mlaznice od 0,40 milimetara, debljina sloja od 0,19 milimetara te puna ispuna materijalom. Puna ispuna materijalom se uzima kako bi rezultati mjerenja bili vjerodostojni i neovisni o postotku ispune predmeta. Ostale postavke ostaju nepromijenjene, odnosno odabiru se unaprijed definirane postavke koje ovise o odabranom materijalu. Postavka „*Raft*“ se odnosi na prve ispisane slojeve koji sačinjavaju podlogu koja prijanja na radnu površinu. Time se smanjuje mogućnost odvajanja i deformiranja predmeta koji se ispisuje na „*Raft*“ podlozi. Nakon što se provjeri točnost svih postavki, pritišće se „*Preview*“.

U „*Preview*“ pregledu se mogu vidjeti odabrane postavke, procijenjeno vrijeme trajanje aditivne izrade i procijenjena potrošnja materijala. Osim toga, moguće je replicirati isti model u

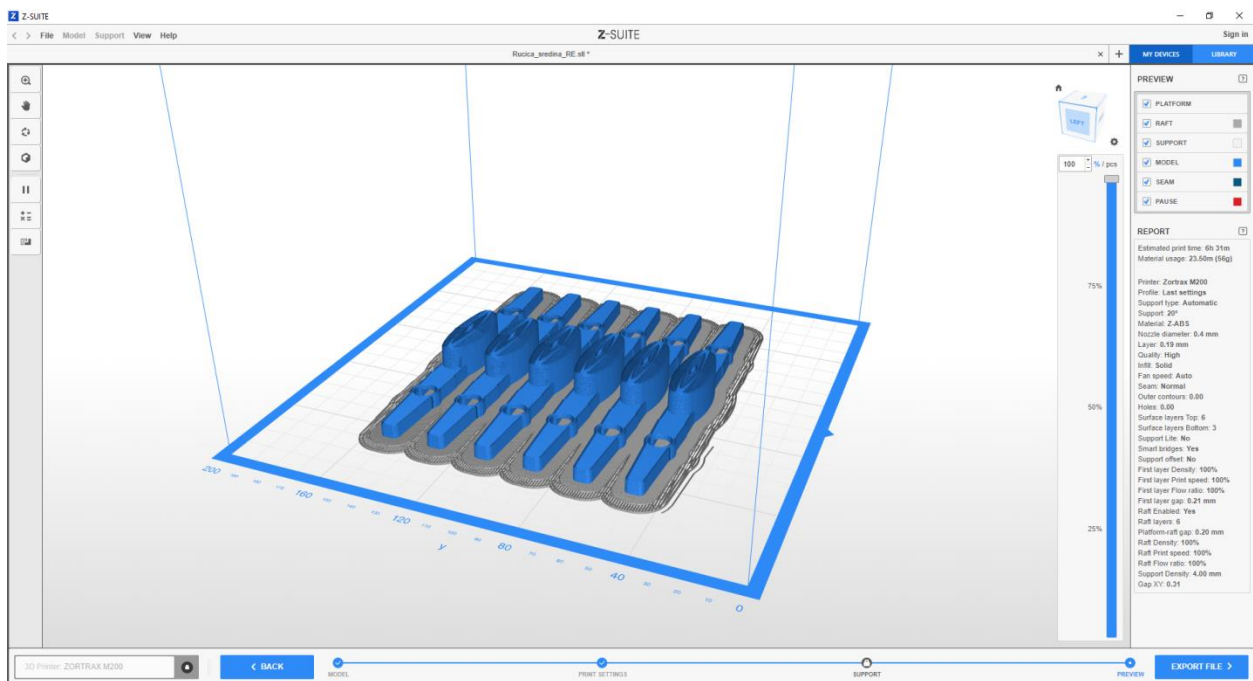
slučaju da je potrebno više primjeraka i izračunati trošak izrade modela. Sa strane se nalazi pokretni klizač s kojim se može vidjeti način izrade sloj po sloj, bilo od građevnog ili potpornog materijala. Kada se provjeri točnost svih postavki odabire se „Export File“ koji stvara G naredbe za M200 3D pišač. Datoteka se zatim sprema na SD karticu i prenosi na 3D pišač koji pokreće aditivnu izradu kopče (slika 4.12).



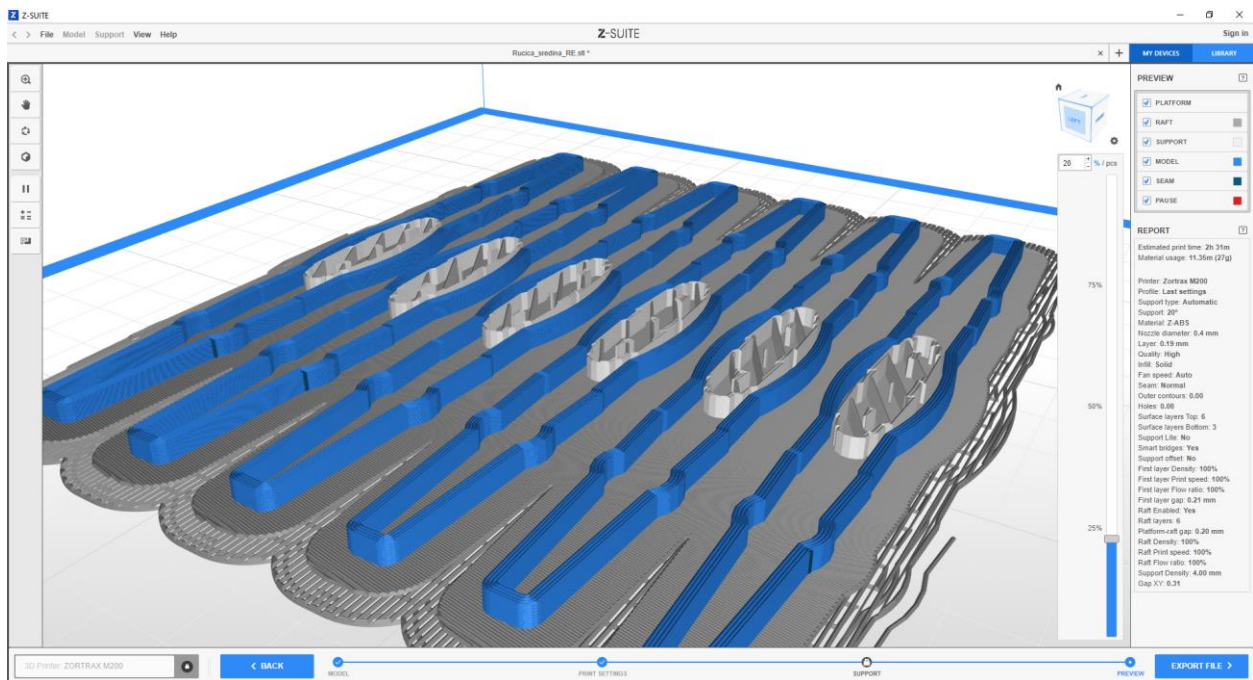
Slika 4.10: Prikaz modela kopči u Z-Suite programu.



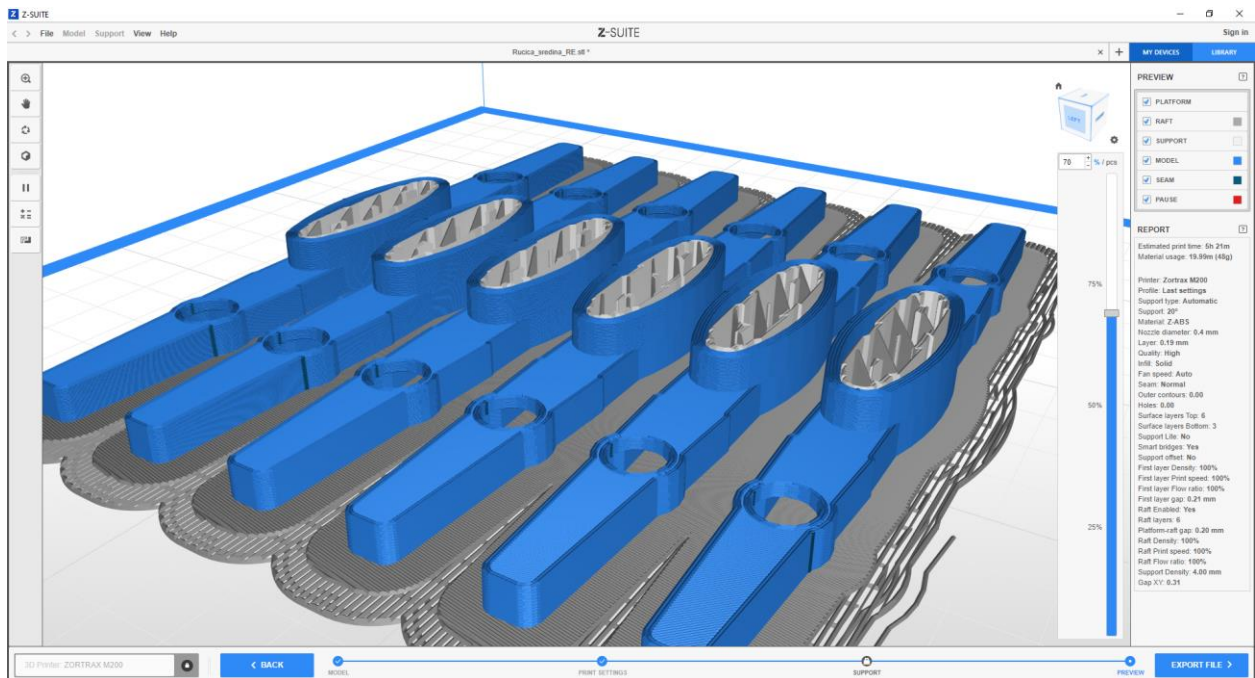
Slika 4.11: Postavke 3D ispis za model kopče.



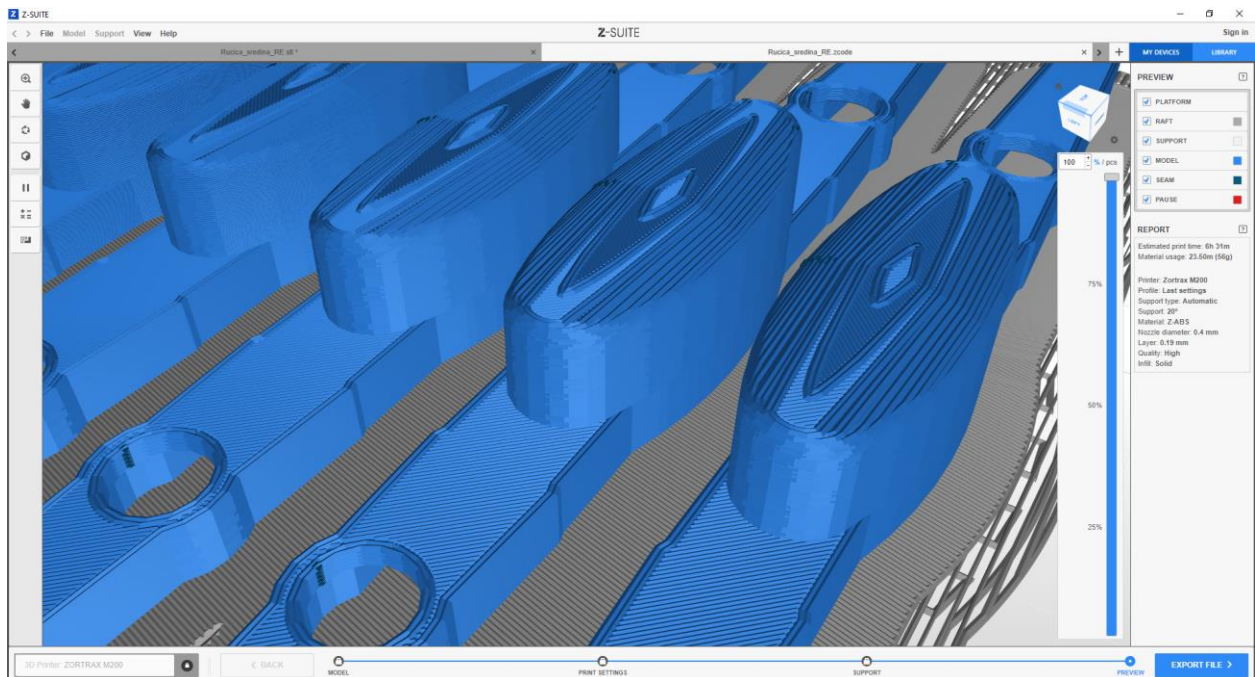
Slika 4.12: Pretpregled dobivenih rezultata.



Slika 4.13: Prikaz slojeva podloge, građevnog i potpornog materijala pri 20% ispisa.



Slika 4.14: Prikaz slojeva i podloge pri 70% ispisa.



Slika 4.15: Izgled površinskih slojeva na vrhu gumba.

4.3.1. Rezultati 3D ispisa

U nastavku se nalazi tablica 4.3 s podacima o potrebnom vremenu za izradu i procijenjenoj količini materijala ovisno o broju komada koji se ispisuju u isto vrijeme. U sklopu tablice se nalazi i ukupna procjena troška izrade s obzirom na trenutačne cijene materijala. U trošak je uključena samo cijena materijala bez cijene rada sata 3D pisača.

Tablica 4.3: Podaci o izradi uzoraka na 3D pisaču Zortrax M200.

Materijal	Z-ABS	Z-ASA Pro	Z-ULTRAT
Vrijeme izrade za 1 komad	1 sat i 9 minuta	1 sat i 14 minuta	1 sat i 24 minute
Vrijeme izrade za 6 komada	6 sati i 31 minuta	7 sati i 1 minuta	8 sati i 2 minute
Količina materijala za 1 komad	10 grama	13 grama	11 grama
Količina materijala za 6 komada	56 grama	69 grama	59 grama
Cijena izrade 1 komada	3,50 HRK	6,89 HRK	5,83 HRK
Cijena izrade 6 komada	19,60 HRK	36,57 HRK	31,27 HRK

Iz tablice 4.3 se može zaključiti da je vremenski brža proizvodnja većeg broja uzoraka odjednom nego pojedinačna izrada na jednoj radnoj površini. Stvaranjem zajedničke podloge štedi se na količini materijala a samim time i izrada uzoraka je jeftinija.

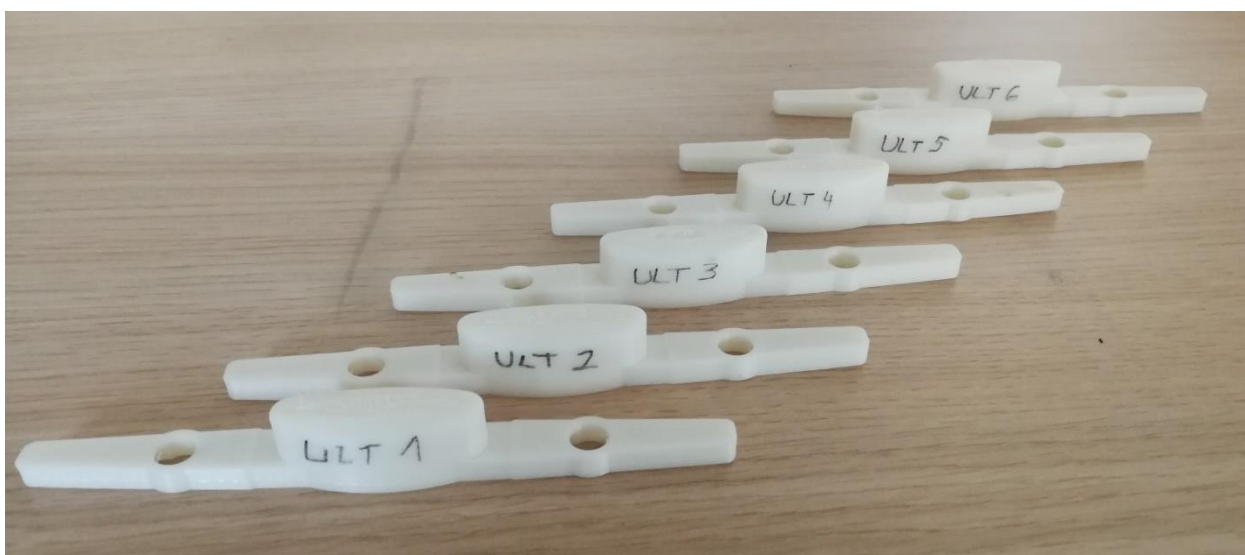
Na sljedećim fotografijama je moguće vidjeti kvalitetu izrade uzoraka kopče sa Zortrax M200 3D pisačem (slike 4.16, 4.17, 4.18).



Slika 4.16: Šest uzoraka od materijala Z-ABS.



Slika 4.17: Šest uzoraka od materijala Z-ASA Pro.

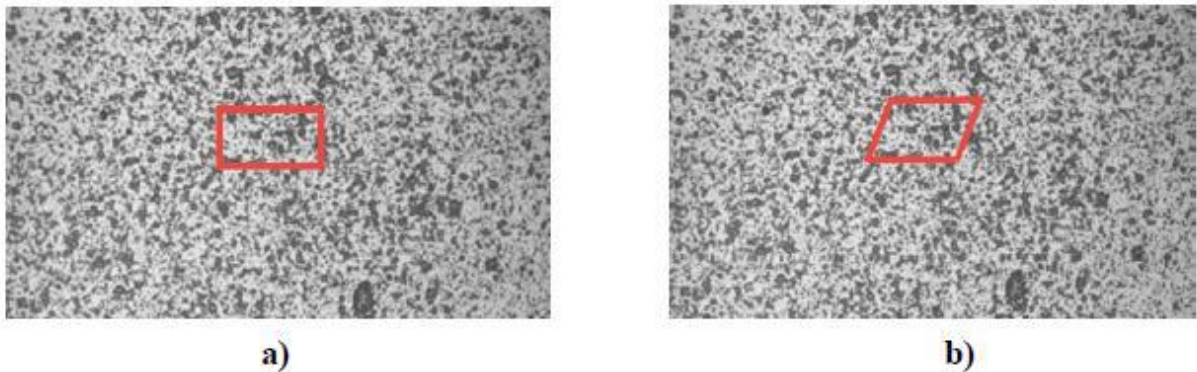


Slika 4.18: Šest uzoraka od materijala Z-ULTRAT.

5. ARAMIS MJERNI SUSTAV

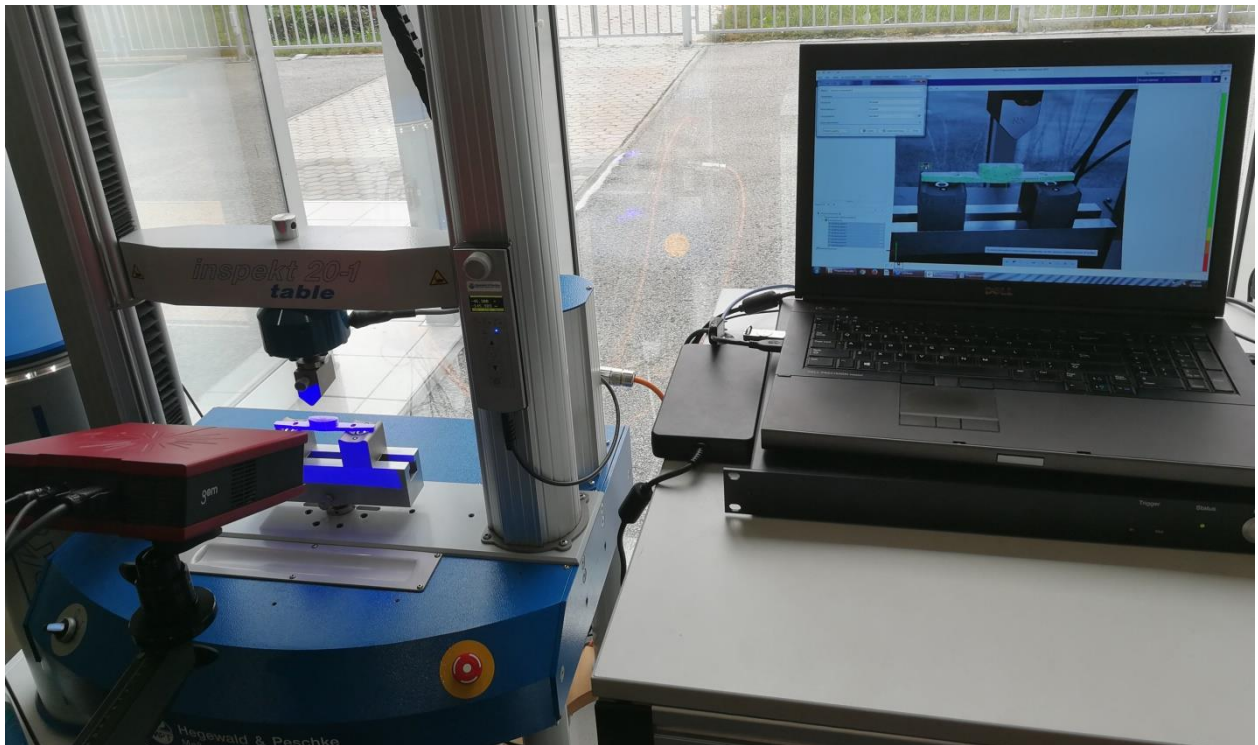
ARAMIS je optički beskontaktni 3D mjerni sustav koji snima, analizira i izračunava deformacije i pomake po cijelom analiziranom području. Sustav radi na principu korelacije digitalne slike, ima mogućnosti mjerenja trodimenzionalne promjene oblika, raspodjelu deformacija na površini, trodimenzionalne pomake, brzine i akceleracije. Može se koristiti za mjerenje i analizu deformacija na metalnim, gumenim, drvenim, kompozitnim i ostalim materijalima [18, 19, 20].

Metoda korelacije digitalne slike se temelji na uspoređivanju digitalne slike stohastičkog uzorka na ispitnom objektu u različitim stadijima deformacije. Uspoređuje se promjena položaja mjernih točaka na stohastičkom uzorku u deformiranom stadiju s nedeformiranim referentnim stadijem. Digitalne slike stohastičkog uzorka su podijeljene na manja područja zvana fasete (engl. *facets*) što se vidi na slici 5.1. U središtu svake kvadratne ili pravokutne fasete se nalazi mjerna točka. Fasete se moraju razlikovati različitim intenzitetom nijanse sive boje, veličinom uzoraka i raspodjelom uzoraka sive boje na površini mjernog objekta. Za primjenu ove metode za trodimenzionalno mjerenje deformacija potrebne su dvije kamere, izvor svjetla i algoritam sustava ARAMIS koji omogućuje korelaciju digitalnih slika [19, 20].



Slika 5.1: Prikaz stohastičkog uzorka i fasete (crveno označeno) na nedeformiranom uzorku (a) i deformiranom uzorku (b) [20].

Postav korišten za potrebe mjerenja deformacija na plastičnim kopčama ručke se sastojao od 3D optičkog skenera ATOS Core 200 opisanog u poglavlju 2.1.2., pomičnog stalka, prijenosnog računala, integrirane upravljačke jedinice te sinkronizirane kidalice Hegewald & Peschke Inspekt table 20. Postav za mjerenje je vidljiv na slici 5.2. Programski alat koji je korišten za snimanje i analiziranje uzoraka je ARAMIS Professional 2020. ARAMIS optički mjerni sustav je korišten za mjerenje progiba na kopči i za mjerenje deformacija prilikom statičkog ispitivanja na kidalici.



Slika 5.2: Prikaz postava ARAMIS sustava.

5.1. Priprema uzorka

Za što točnija mjerenja deformacija na ispitnim uzorcima pomoću metode korelacije digitalne slike potrebne su nepravilne teksture i uzorci na površini objekta. Za dobivanje stohastičkog uzorka na površini korištene su boje iz spremnika pod tlakom. Na uzorak je prvo potrebno nanijeti prozirni temeljni premaz za plastiku i ostaviti da se osuši. Nakon sušenja se nanosi akrilna nereflektirajuća bijela boja. Na obojanoj bijeloj površini se zatim oprezno stavlja crna boja na bazi grafitu jednolično po cijeloj površini da bi se dobio odgovarajući stohastički uzorak. Grafitne točke na bijeloj podlozi trebaju biti različitih veličina i približno jednolične gustoće. Na slici 5.3 je moguće vidjeti stohastički uzorak grafitnih točaka na korištenom ispitnom uzorku.



Slika 5.3: Stohastički uzorak na površini ispitnog uzorka.

5.2. Kidalica

Za statičko i dinamičko ispitivanje je korištena kidalica Hegewald & Peschke Inspekt table 20 sinkronizirana s 3D mjernim sustavom ARAMIS. Ima mogućnost ispitivanja vlačne i tlačne čvrstoće te ispitivanja uzoraka na savijanje i torziju. Softver za ispitivanje i analiziranje podataka koji se koristi uz kidalicu se zove LabMaster. Upravljanje kidalicom i mijenjanje njenih parametara poput sile i brzine hoda je moguće direktno preko ručnog panela na uređaju ili pomoću navedenog softvera [21]. U tablici 5.1 je prikazana specifikacija uređaja.

Tablica 5.1: Specifikacija kidalice Hegewald & Peschke Inspekt table 20 [21].

Nominalno opterećenje [kN]	20
Brzina pri ispitivanju [mm/min]	0,01 - 600
Povratna brzina [mm/min]	600
Snaga [W]	300
Rezolucija putanje [μm]	0,01
Dimenzije [mm]	685 x 550 x 1420
Masa [kg]	130
Mjerni raspon opterećenja	0,2% – 100% nominalnog opterećenja
Radna širina [mm]	420
Maksimalni hod bez alata [mm]	1100



Slika 5.4: Prikaz korištenog uređaja Hegewald & Peschke Inspekt table 20 [21].

6. ISPITIVANJA I MJERENJA

Izvršene su tri vrste ispitivanja i mjerenja na proizvedenim kopčama ručke pomoću optičkog mjernog sustava ARAMIS i kidalice. Početno mjerenje progiba je napravljeno za dobivanje potrebnih parametara za kasnije dinamičko cikličko ispitivanje. Statičkim ispitivanjem na savijanje su dobiveni rezultati koji su iskorišteni za redizajniranje kopče i poboljšavanje njenih svojstava.

6.1. Mjerenje progiba

Kopča se postavlja na potreban položaj unutar ručke na dva oslonca. Gumb kopče se opterećuje proizvoljnom silom prstom ruke. Kopča je pritisnuta nekoliko puta normalnom potrebnom silom za aktiviranje sklopa ispod ručke. Nakon toga kopču se pritišće većom silom da se izmjeri maksimalni dobiveni progib. Maksimalni progib koji je izmjeren se zatim koristi kao amplituda hoda gornje čeljusti kidalice za cikličko dinamičko ispitivanje. Mjerenje je izvršeno na tri uzorka, po jedan za svaki korišteni materijal. Za mjerenje se koristio mjerni sustav ARAMIS s 3D optičkim skenerom ATOS Core 200.

6.1.1. Postupak mjerenja

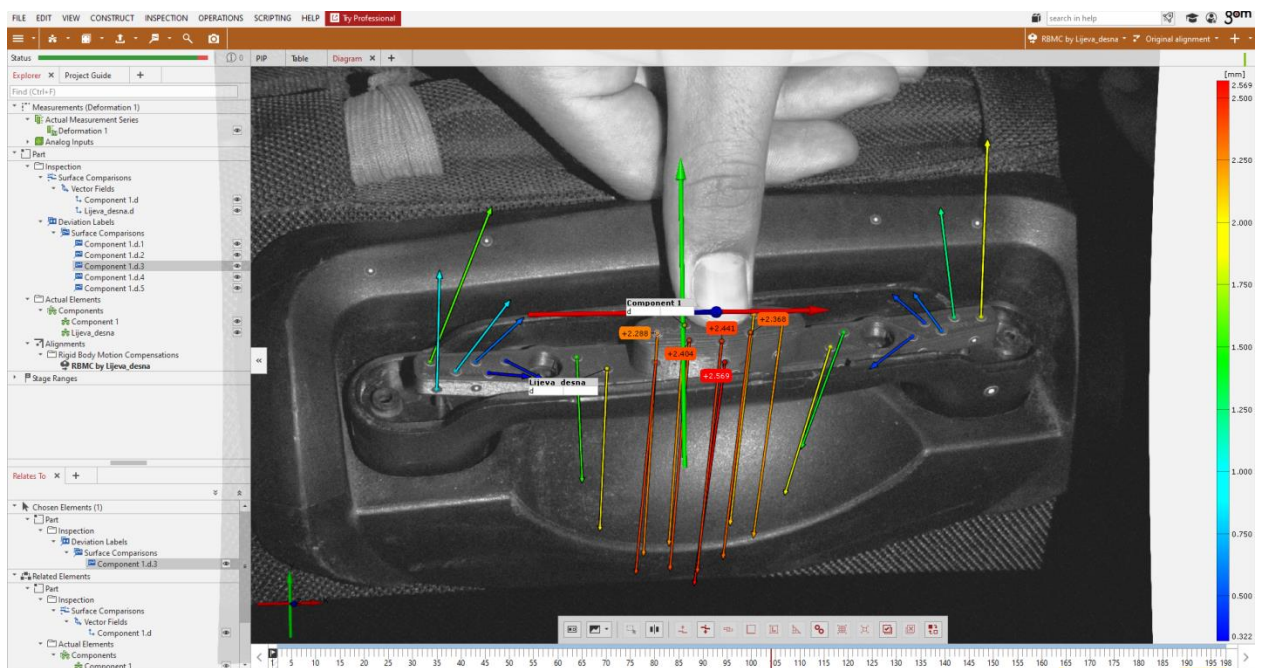
Prije početka mjerenja potrebno je kalibrirati 3D optički skener kao što je opisano u poglavlju 2.3. Na bočnu i gornju plohu uzorka plastične kopče ručke se postavljaju referentne točke dimenzija 0,80 milimetara.

Nakon odrađenih pripremnih radnji započinje se postupak 3D mjerenja pomoću skenera. U softveru ARAMIS Professional 2020 se odabire korištena veličina referentnih točaka i postavlja se frekvencija snimanja u jednoj sekundi. Postavljena frekvencija snimanja je 7 Hz, odnosno 3D skener snima sedam snimki u jednoj sekundi. Prikaz postava za mjerenje se može vidjeti na slici 6.1, a izgled sučelja programa ARAMIS Professional 2020 je moguće vidjeti na slici 6.2.

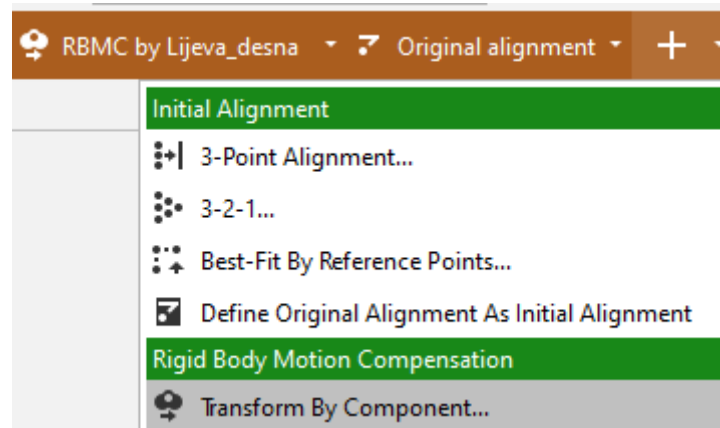
U postavkama se definira komponenta točaka opcijom „*Point Component*“. Označavaju se sve točke na krajevima kopče i odabire se tip deformacijske komponente u opciji „*Point Component*“. Odabire se nova mjerna serija i započinje snimanje pritiskanja kopče prstom. Nakon završenog snimanja odabire se poravnanje „*Rigid Body Motion Compensation*“ te se odabire transformiranje po već stvorenoj komponenti točaka. Nakon poravnanja odabiremo postavku za mjerenje pomaka te postavimo željene devijacijske oznake na snimljene referentne točke po površini kopče. Na slikama 6.3, 6.4 i 6.5 je moguće vidjeti odabrane postavke.



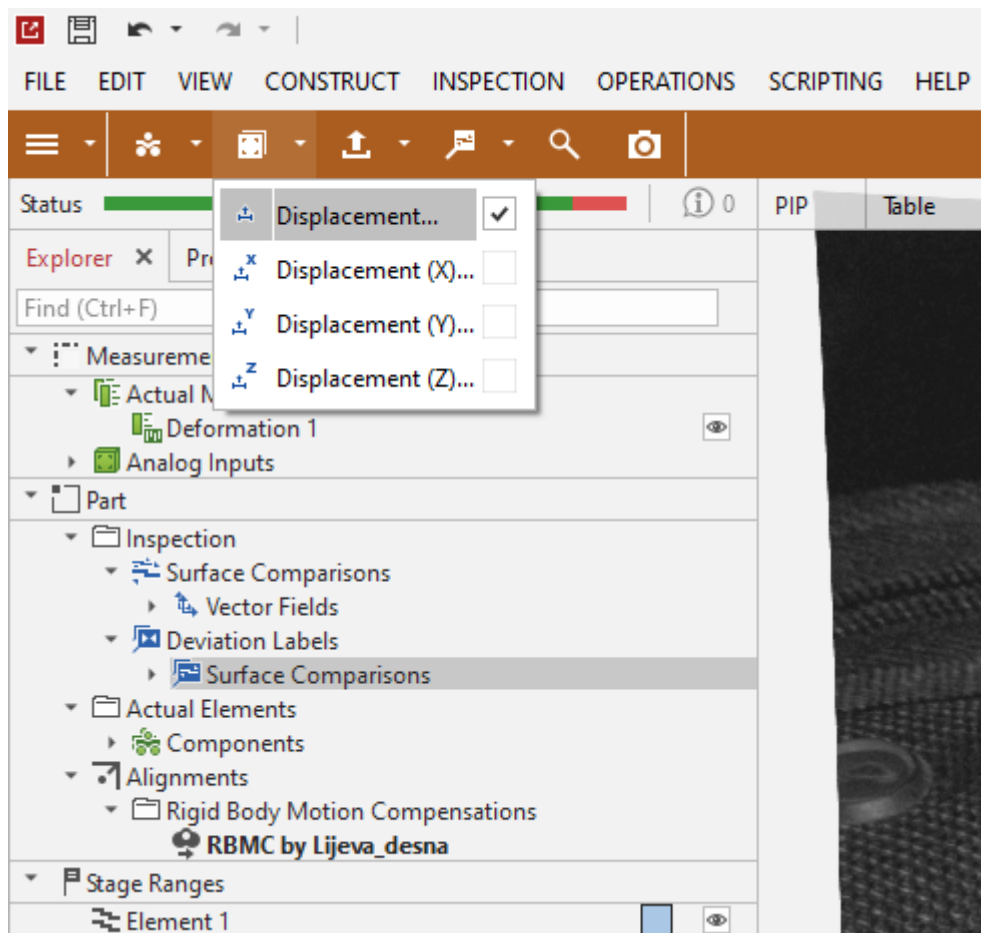
Slika 6.1: Postav za mjerenje progiba kopče na ručki ručne prtljage.



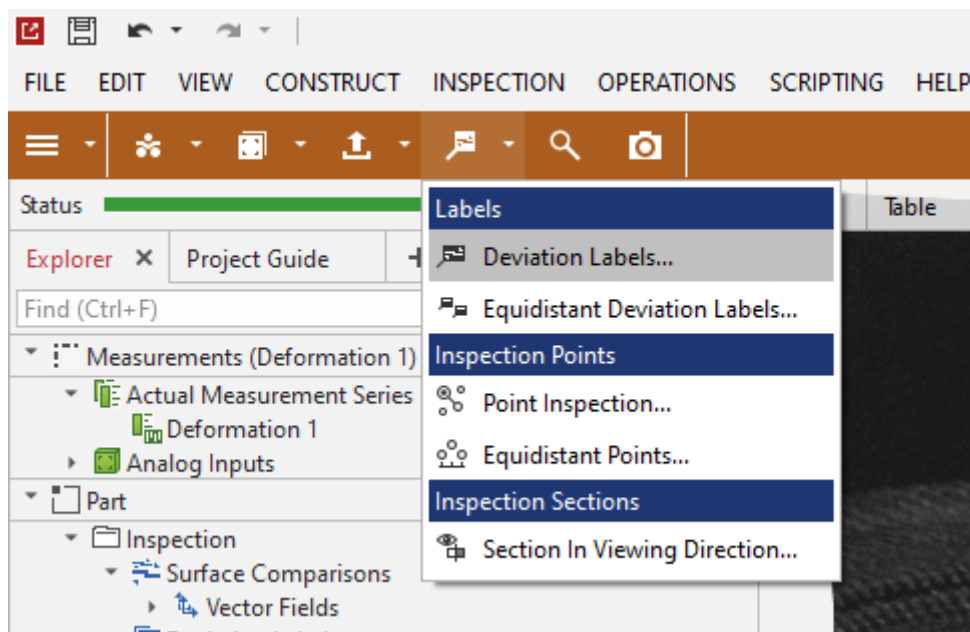
Slika 6.2: Sučelje korištenog softvera.



Slika 6.3: Postavke poravnanja.



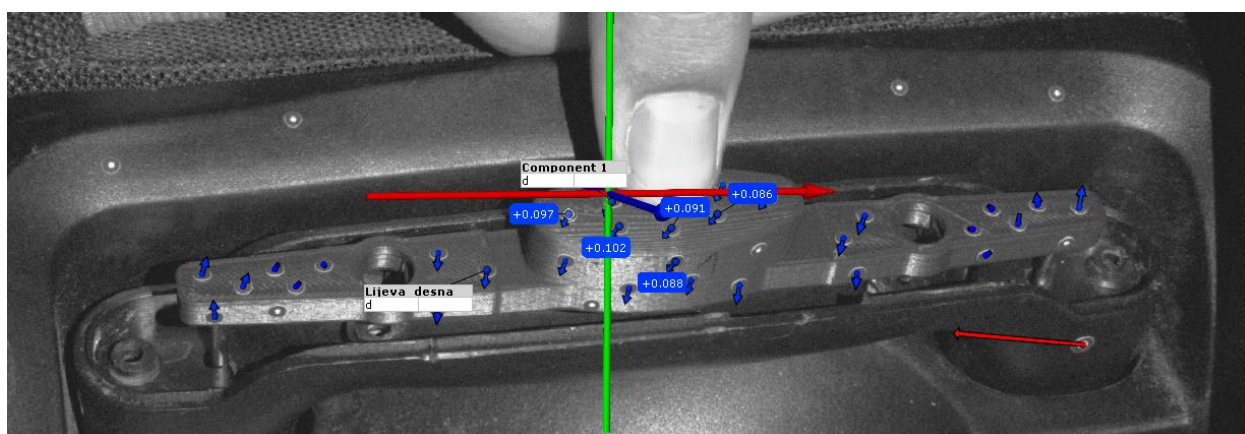
Slika 6.4: Postavke pomaka.



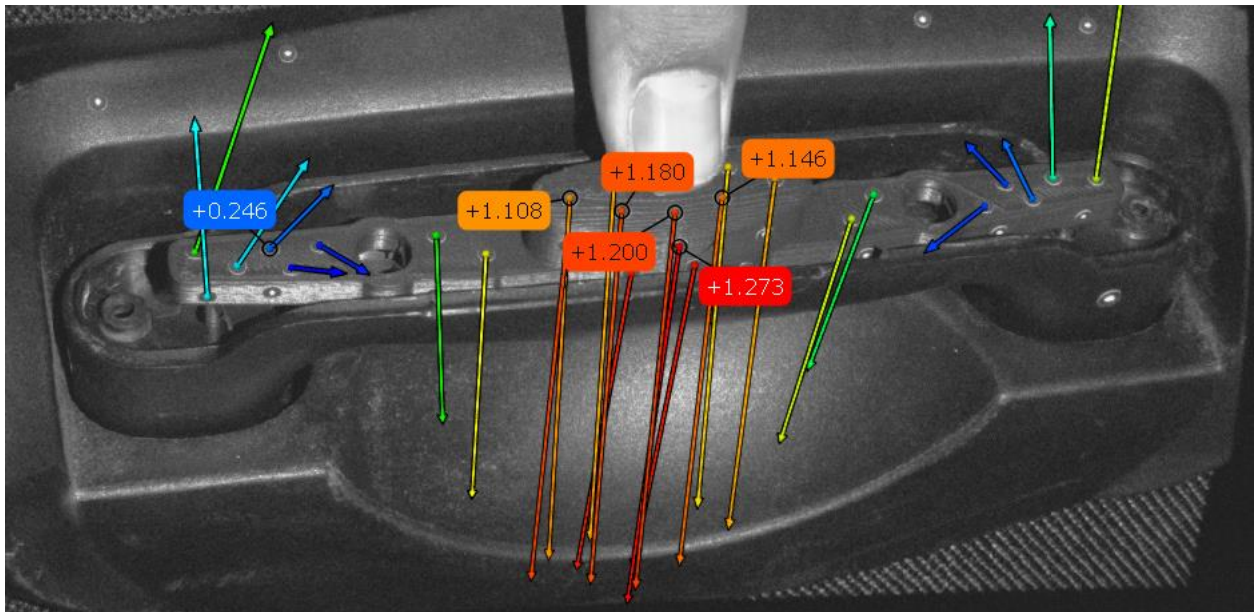
Slika 6.5: Odabir devijacijskih oznaka.

6.1.2. Rezultati mjerenja

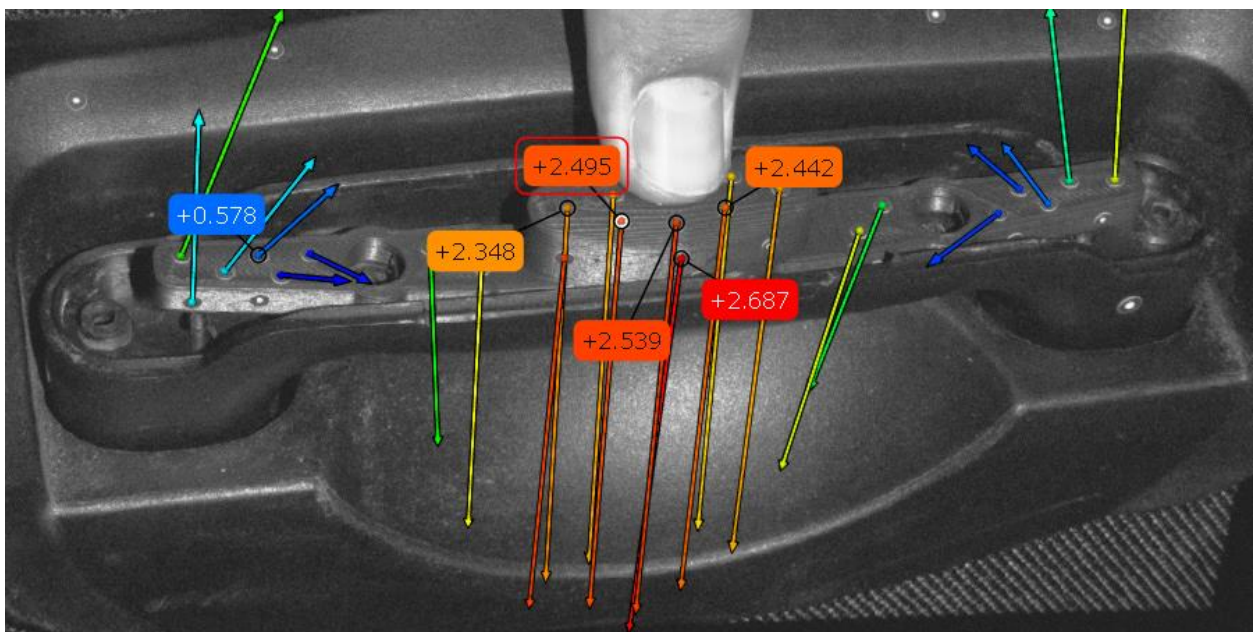
Rezultati mjerenja progiba se vide na odabranim devijacijskim oznakama na referentnim točkama. Sve vidljive i prepoznate referentne točke dobivaju vektor smjera. Na prikazanim dijagramima apscisa označava broj snimaka u vremenskom rasponu mjerenja dok ordinata označava pomak referentnih točaka u odnosu na odabranu komponentu točaka. Rezultati plastične kopče proizvedene od materijala Z-ABS su prikazani na slikama 6.6, 6.7, 6.8 i 6.9.



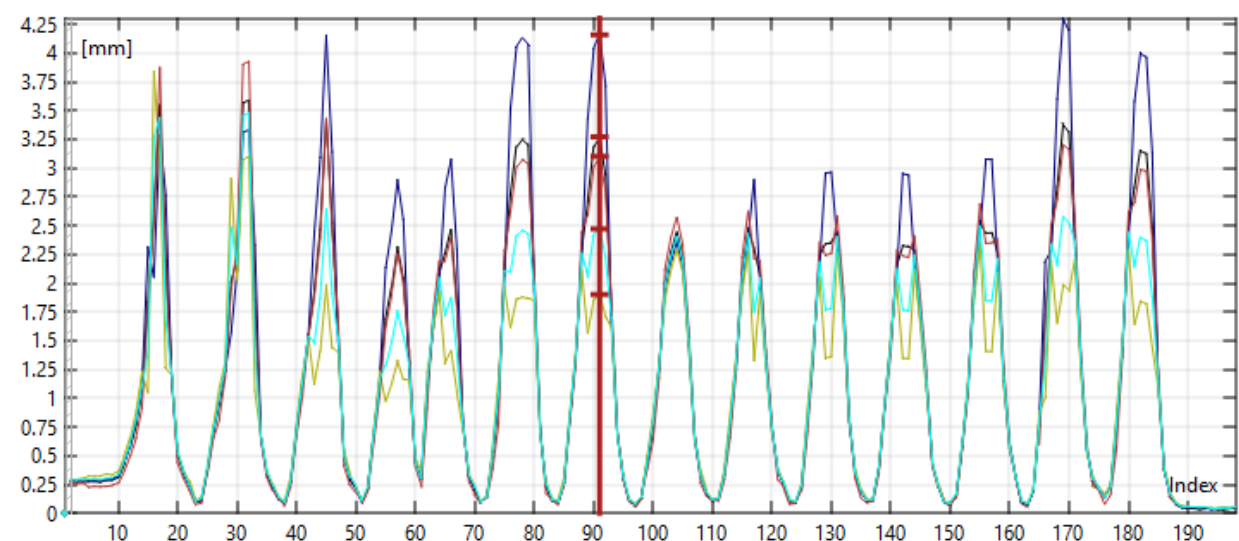
Slika 6.6: Prikaz rezultata na gumbu kopče prije početka pritiskanja prstom.



Slika 6.7: Prikaz rezultata prilikom normalnog opterećivanja gumba.



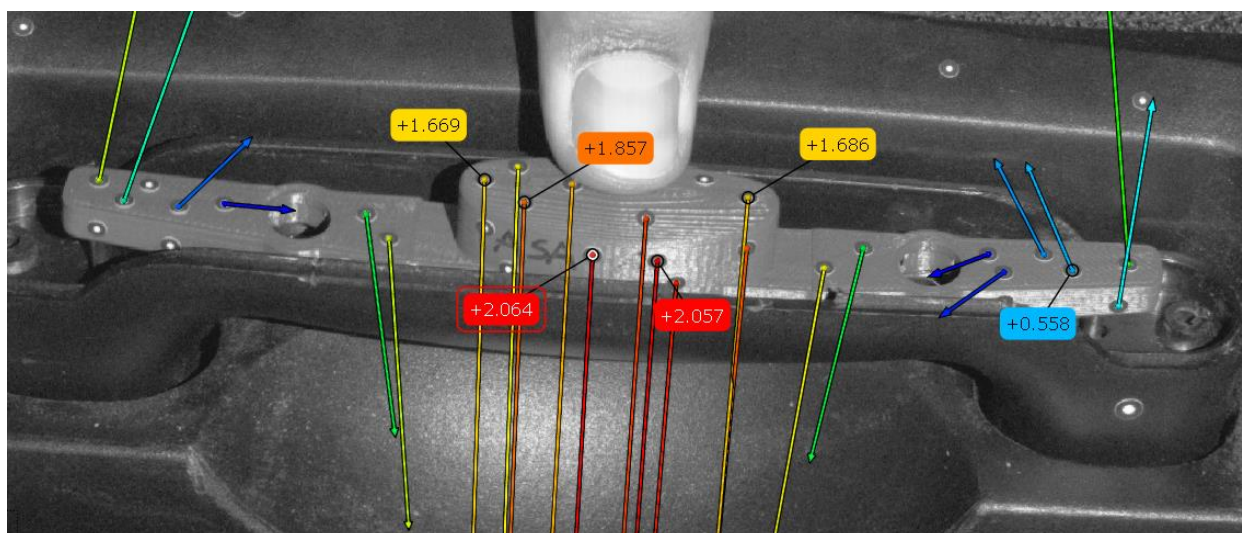
Slika 6.8: Prikaz rezultata tijekom maksimalnog opterećivanja gumba kopče.



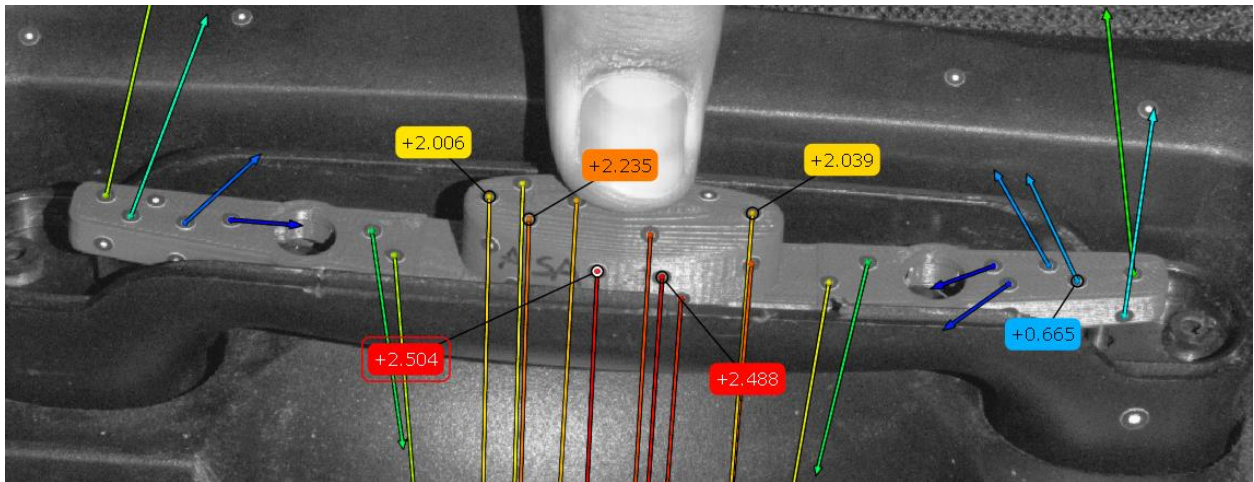
Slika 6.9: Prikaz pomak - vrijeme dijagrama za materijal Z-ABS.

Iz dijagrama na slici 6.9 je vidljivo da je na kopču vršeno opterećenje sveukupno četrnaest puta. Od tih četrnaest puta, pet puta je kopča pritisnuta silom većom od one potrebne za aktiviranje sklopa ručke. Rezultati na dijagramu pokazuju da progib pri normalnom pritiskanju varira od 2,20 do 3,00 milimetara ovisno o referentnoj točki. Progib pri maksimalnoj sili varira od 2,00 do 4,30 milimetara. Na temelju ovih rezultata, odabrana je vrijednost od 3,50 milimetara za amplitudu pri dinamičkom cikličkom ispitivanju.

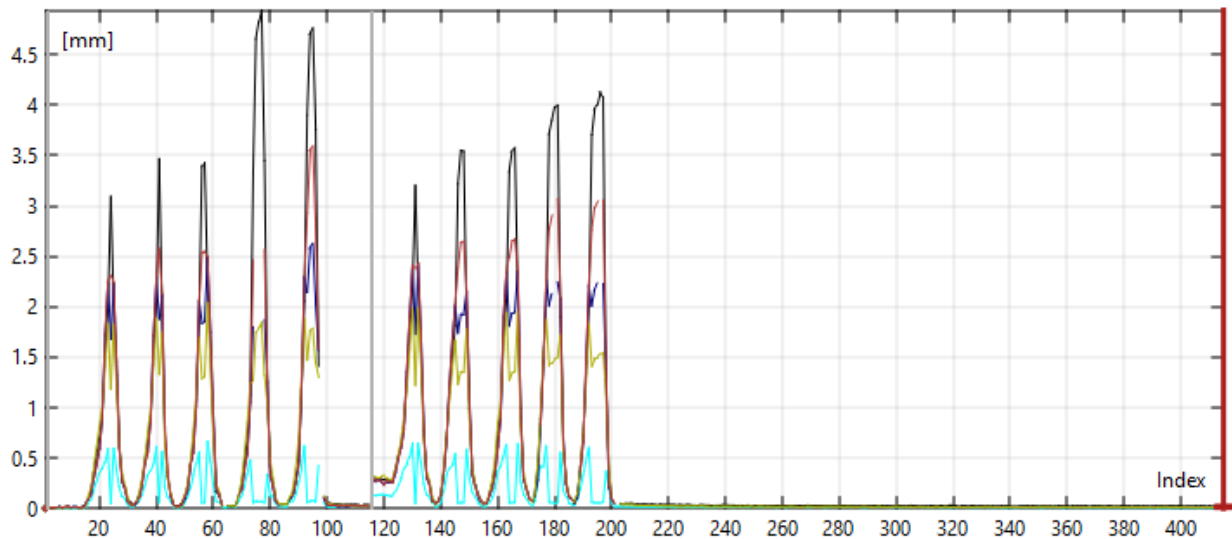
Na slikama 6.10, 6.11 i 6.12 se nalaze prikazi rezultata za materijal Z-ASA Pro.



Slika 6.10: Prikaz rezultata pri normalnom pritisku za materijal Z-ASA Pro.



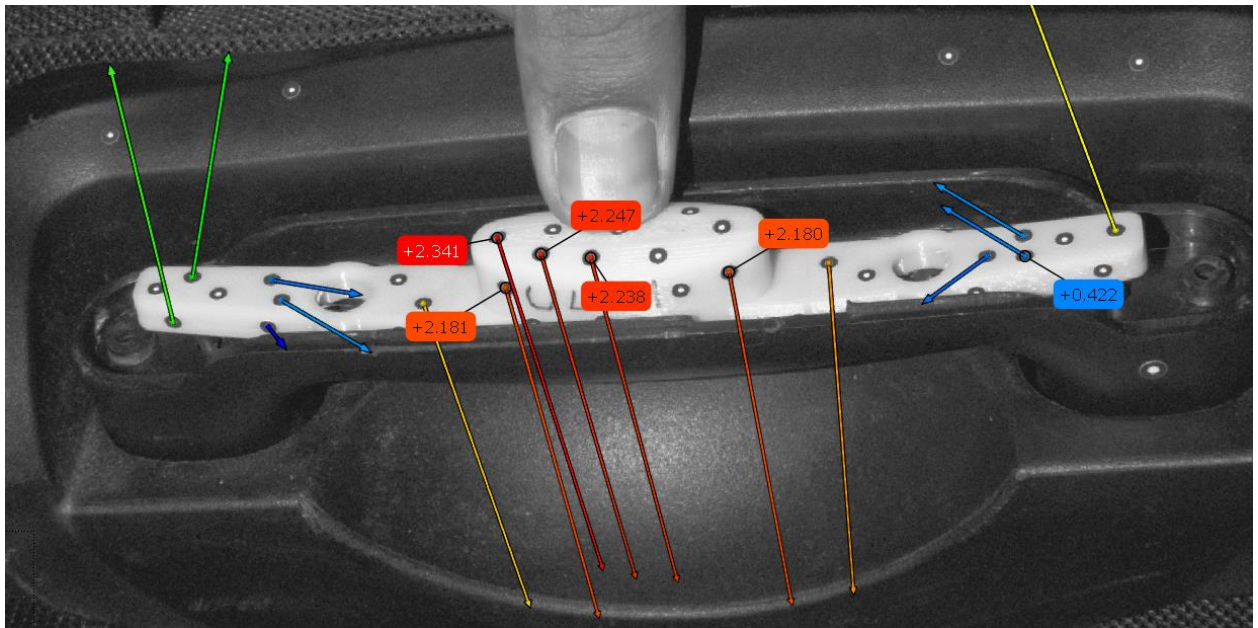
Slika 6.11: Prikaz rezultata tijekom maksimalnog pritiskanja za materijal Z-ASA Pro.



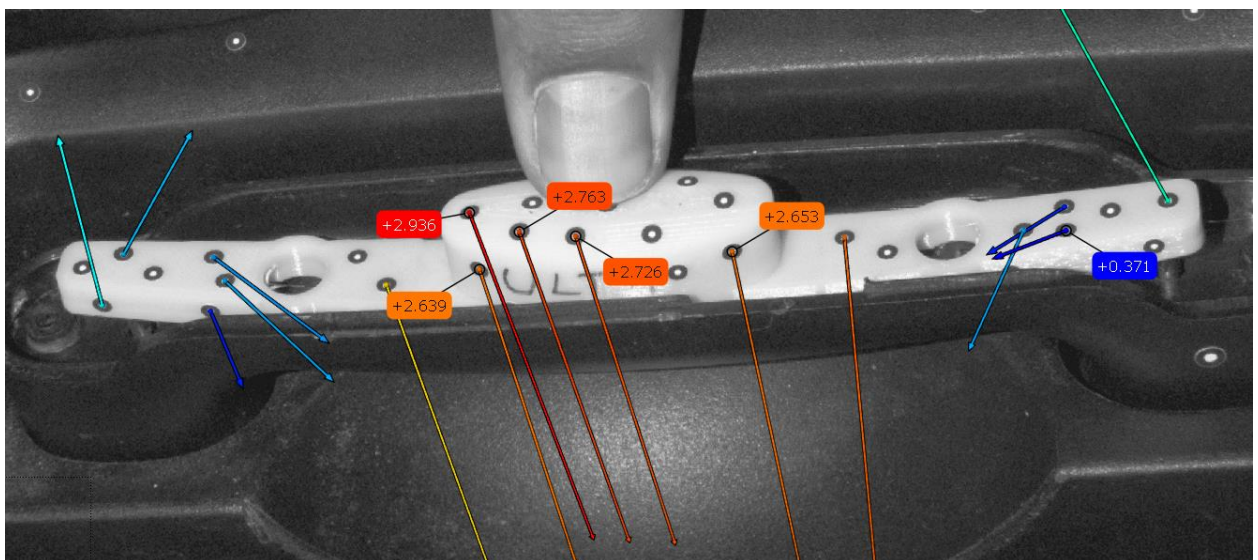
Slika 6.12: Dijagram rezultata mjerenja progiba za kopču od Z-ASA Pro materijala.

Na prethodnom dijagramu se može vidjeti da je na kopču ručke djelovala sila ukupno deset puta. Četiri puta je na gumb kopče stavljeno maksimalno opterećenje. Mjerenje je ponovljeno dva puta te su rezultati drugog mjerenja uzeti za mjerodavne. Pri normalnom opterećenju progib je iznosio od 1,30 milimetara pa sve do 3,60 milimetara. Progib pri maksimalnom opterećenju je iznosio od 1,40 do 4,10 milimetara. Za dinamičko ispitivanje kopče od Z-ASA Pro materijala uzeta je vrijednost amplitude od 3,50 milimetara.

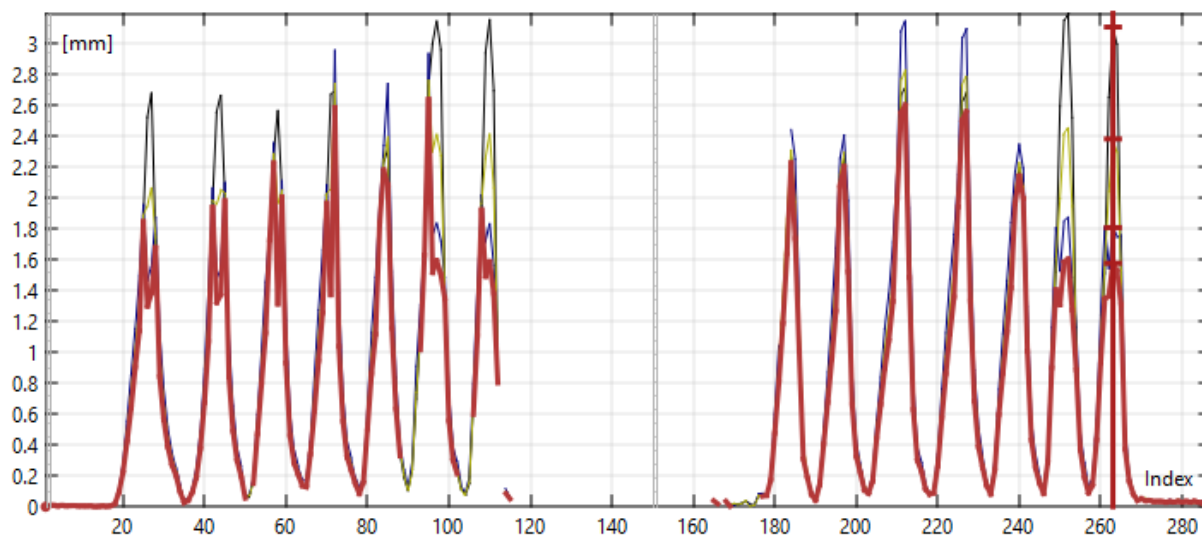
Sljedeći ispitani uzorak je od Z-ULTRAT materijala čije je rezultate moguće vidjeti na slikama 6.13, 6.14 i 6.15.



Slika 6.13: Prikaz normalnog opterećenja na Z-ULTRAT materijalu.



Slika 6.14: Prikaz maksimalnog opterećenja na Z-ULTRAT materijalu.



Slika 6.15: Dijagram izmjereneoog progiba za kopču od Z-ULTRAT materijala.

Mjerenje progiba za Z-ULTRAT materijal je izvršeno dva puta, mjerodavni rezultati su uzeti od drugog mjerenja. Na dijagramu je vidljivo pritiskanje gumba četrnaest puta. Normalnim opterećenjem gumb kopče je pritisnut osam puta. Izmjereni progib za normalno opterećenje iznosi od 2,00 do 2,40 milimetara. Maksimalni izmjereni progib iznosi 3,10 milimetara. Iz dijagrama na slici 6.15 je vidljivo da kopča od Z-ULTRAT materijala ima najveću krutost. Za potrebe dinamičkog ispitivanja uzeta je vrijednost amplitude od 2,70 milimetara.

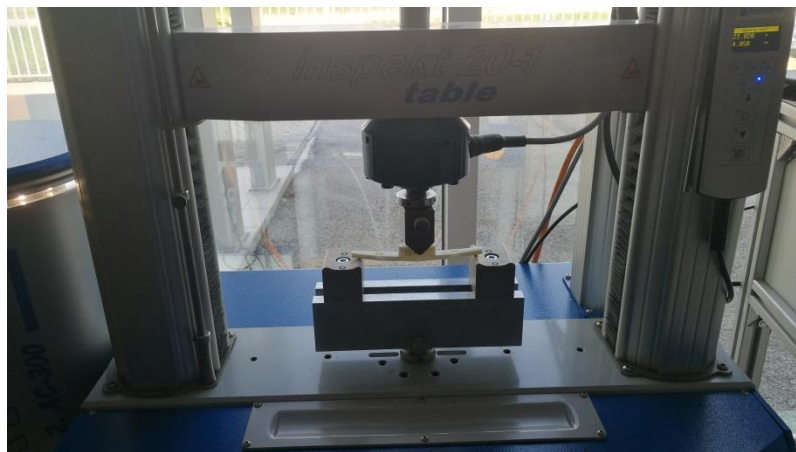
6.2. Dinamičko cikličko ispitivanje

Dinamičkim ispitivanjem je ispitana izdržljivost kopče ručke na učestalo korištenje. Pretpostavka je da prosječan korisnik ručne prtljage koristi prtljagu 10 puta godišnje. Prilikom jednog putovanja korisnik će pritisnuti gumbe kopče otprilike 20 puta. Uz pretpostavku da se očekuje vijek trajanja ručne prtljage od 3 godine, jednostavnom računicom se dolazi do broja pritiskanja kopče ručke od 600 puta. Iz tog razloga broj ciklusa je 600 na dinamičkom ispitivanju.

Prije samog ispitivanja, uzorak kopče od svakog materijala se skenira 3D optičkim skenerom ATOS Core 200. Postupak se ponavlja i nakon završenog dinamičkog ispitivanja. Svrha skeniranja je mjerenje dobivenih deformacija na uzorcima pomoću programa GOM Inspect.

6.2.1. Parametri ispitivanja

Dinamičko ispitivanje se sastoji od savijanja u tri točke koje se ponavlja 600 ciklusa. Međusobna udaljenost između oslonaca donje čeljusti iznosi 123,00 milimetara. Udaljenost od lijevog oslonca i središnje osi je 61,00 milimetara, a desnog oslonca i središnje osi 62,00 milimetara. Promjeri donjih oslonaca iznose 6,00 milimetara dok je promjer valjka za opterećivanje s gornje čeljusti 10,00 milimetara. Brzina vertikalnog hoda gornje čeljusti je 0,50 mm/s uz kontrolu pomaka, a brzina pri praznom hodu je 10,00 mm/s. Akvizicija podataka o pomaku i sili bilježena je svakih 20 ms. Valjak za opterećivanje pruža sinusoidno opterećenje na uzorak s amplitudom pomaka od 3,50 milimetara za uzorke od Z-ABS i Z-ASA Pro materijala te 2,70 milimetara u slučaju uzoraka od Z-ULTRAT materijala. Ispitivanja su vršena na dva uzorka od svake vrste materijala.



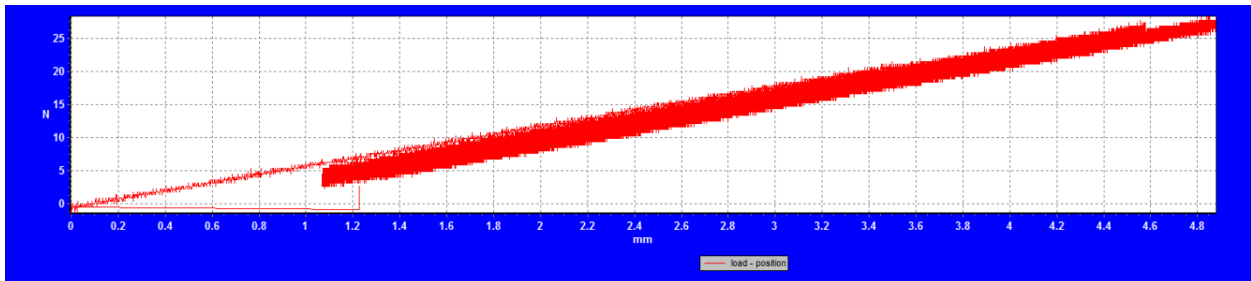
Slika 6.16: Postav za dinamičko ispitivanje na kidalici.



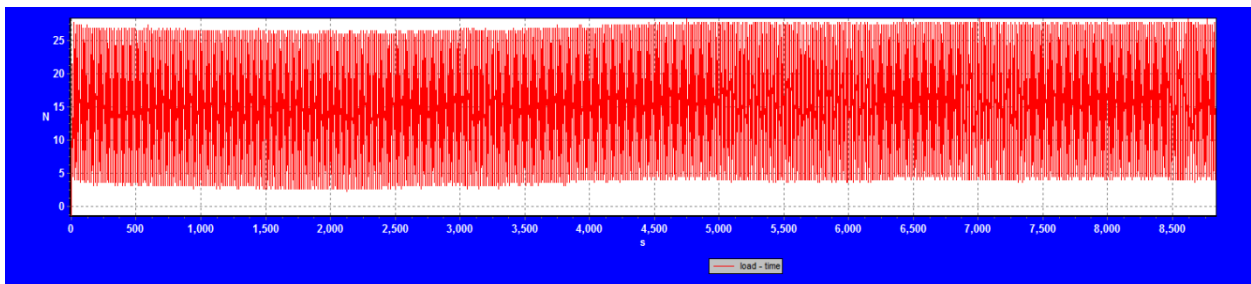
Slika 6.17: Ispitivanje na uzorku od Z-ULTRAT materijalu.

6.2.2. Rezultati mjerenja iz LabMastera

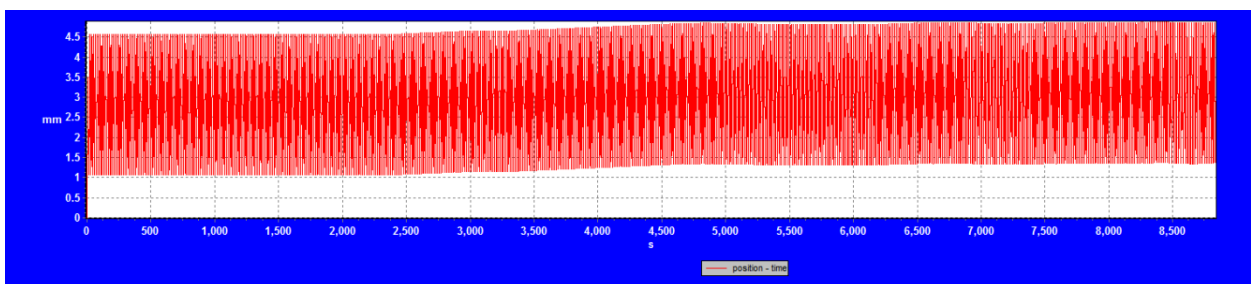
Vizualnim pregledom je utvrđeno da nema većih deformacija na šest ispitanih uzoraka i da imaju zadovoljavajuću izdržljivost. Na sljedećim slikama su prikazani dijagrami rezultata iz programskog alata LabMaster.



Slika 6.18: Dijagram sila – pomak za uzorak materijala Z-ABS.

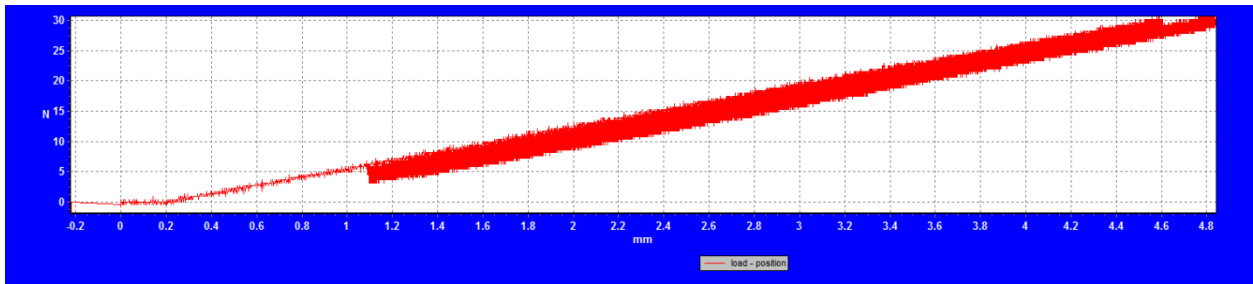


Slika 6.19: Dijagram sila – vrijeme za uzorak materijala Z-ABS.

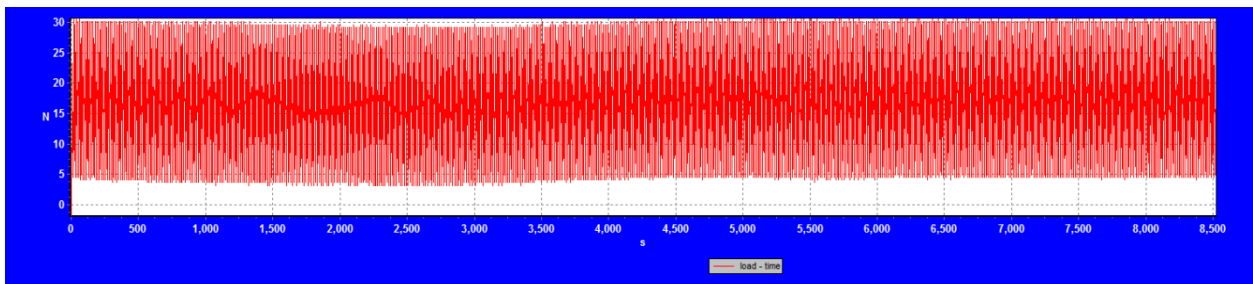


Slika 6.20: Dijagram pomak – vrijeme za uzorak materijala Z-ABS.

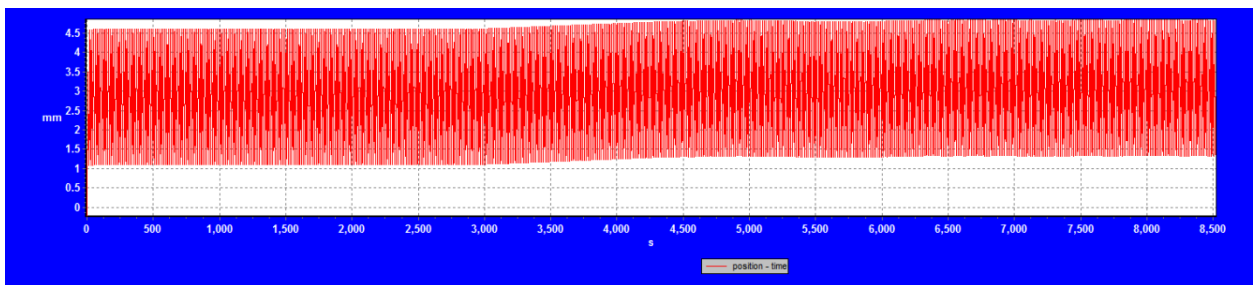
Iz priloženih dijagrama je vidljivo da je tijekom ispitivanja došlo do blagog pomaka za 0,30 milimetara što znači da je došlo do blagih deformacija. Najveća sila potrebna da bi se ostvario pomak od 3,50 milimetara je iznosila 26,50 N kod oba uzorka. Na dijagramu sa slike 6.19 se vidi da je kidalici potrebno prednaprezanje u iznosu od 5,00 N prije nastavka opterećivanja uzorka.



Slika 6.21: Dijagram sila – pomak za uzorak materijala Z-ASA Pro.

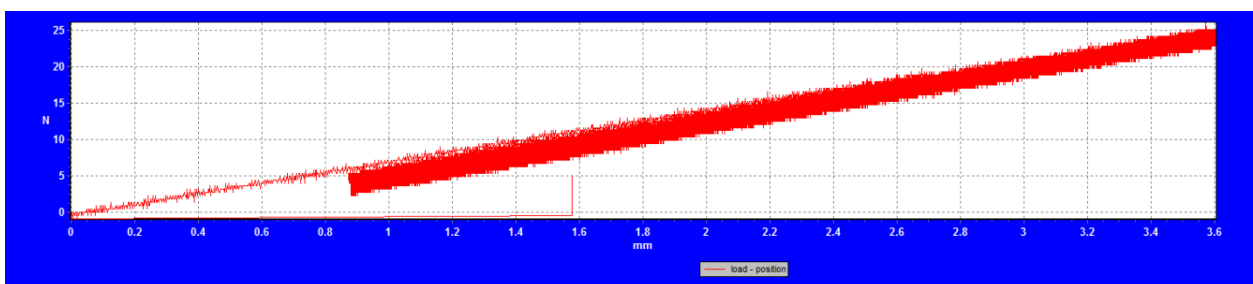


Slika 6.22: Dijagram sila – vrijeme za uzorak materijala Z-ASA Pro.

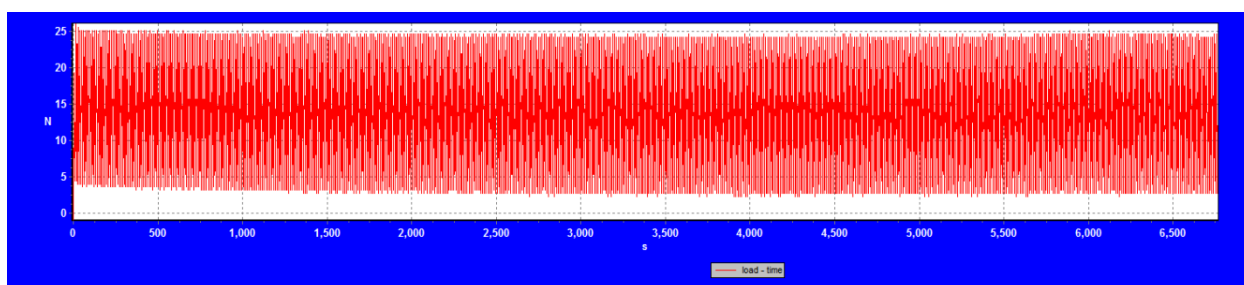


Slika 6.23: Dijagram pomak – vrijeme za uzorak materijala Z-ASA Pro.

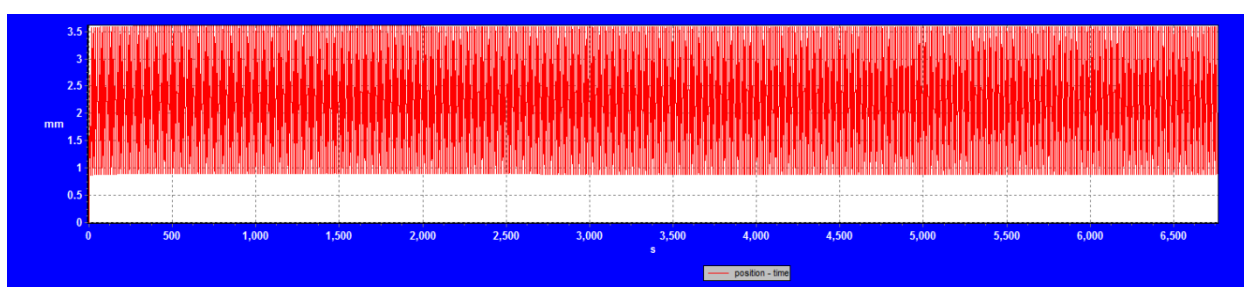
Iz dijagrama se može očitati maksimalno opterećenje od 30,00 N za pomak od 3,50 milimetara te pomak nastao deformiranjem u iznosu od 0,20 milimetara. Iz slike 6.21 se vidi da je kidalica imala 1,10 milimetara praznog hoda prije dostizanja napreznja od 5,00 N.



Slika 6.24: Dijagram sila – pomak za uzorak materijala Z-ULTRAT.



Slika 6.25: Dijagram sila – vrijeme za uzorak materijala Z-ULTRAT.



Slika 6.26: Dijagram pomak – vrijeme za uzorak materijala Z-ULTRAT.

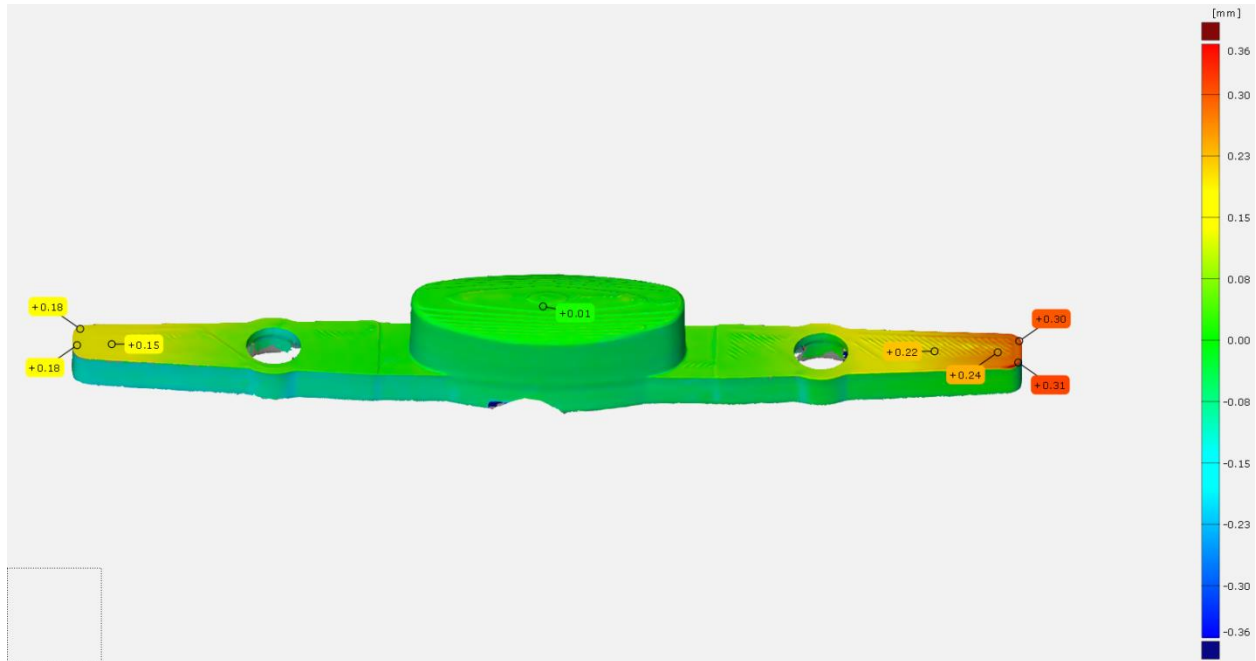
Dijagram sa slike 6.24 prikazuje najveće opterećenje od 25,00 N potrebnih da bi se uzorak pritisnuo za 2,70 milimetara. S obzirom na smanjeni vertikalni hod gornje čeljusti kidalice, na apscisi dijagrama sa slika 6.25 i 6.26 je moguće vidjeti kraće trajanje ispitivanja.

6.2.3. Mjerenje deformacija

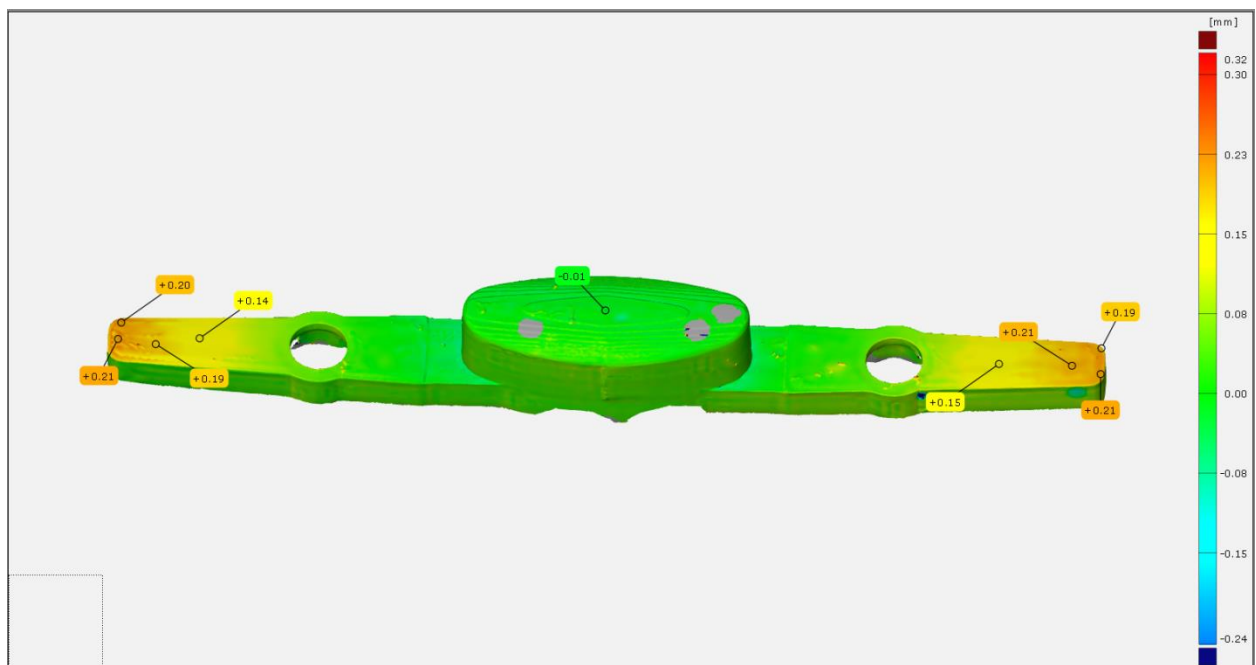
Nakon završenih ispitivanja uzorci su skidani i snimljeni s optičkim 3D skenerom. Skenirani ispitni uzorci su uspoređeni u programu za 3D mjerenja GOM Inspect 2019. U program su unesene STL datoteke uzoraka snimljenih prije i poslije ispitivanja te su poravnati. Za potrebe mjerenja korišteno je poravnanje „*Local Best-Fit*“ na području gumba kopče kako bi se vidjele površinske deformacije na rubovima kopče. Na slikama 6.27, 6.28 i 2.29 je moguće vidjeti dobivene rezultate za pojedine materijale.

Iz mjerenja se može vidjeti da se najviše deformirao uzorak od Z-ABS materijala na jednom rubu u iznosu od 0,31 milimetara, odnosno 0,18 milimetara na drugom kraju. Uzorak od Z-ULTRAT materijala ima maksimalnu deformaciju od 0,25 milimetara na jednoj strani te 0,12 milimetara na drugoj. Ispitni uzorak od Z-ASA Pro materijala je imao jednake deformacije na oba kraja u maksimalnom iznosu od 0,21 milimetara.

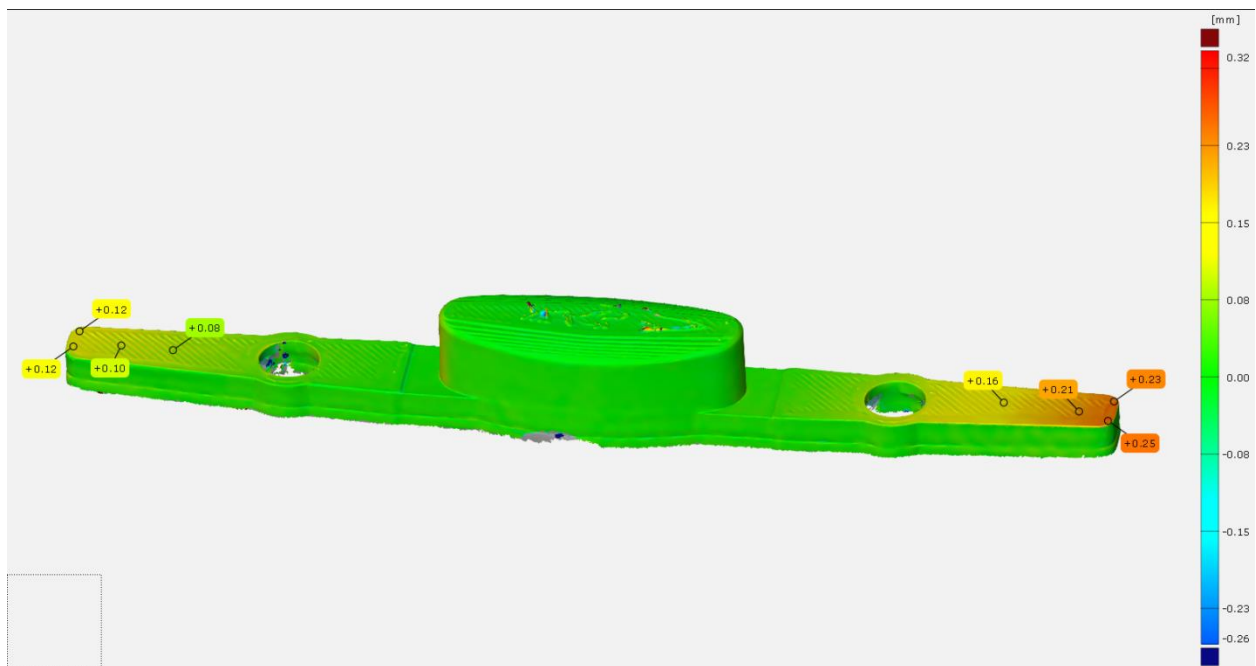
Dobivene deformacije na rubovima kopči nakon 600 ciklusa nisu velike te ne utječu na funkcionalnost cijelog sklopa ručke, time se može zaključiti da svi ispitani materijali zadovoljavaju cikličko dinamičko ispitivanje.



Slika 6.27: Prikaz deformacija nakon dinamičkog ispitivanja na kopči od Z-ABS materijala.



Slika 6.28: Prikaz deformacija nakon dinamičkog ispitivanja na kopči od Z-ASA Pro materijala.



Slika 6.29: Prikaz deformacija nakon dinamičkog ispitivanja na kopči od Z-ULTRAT materijala.

6.3. Statičko ispitivanje

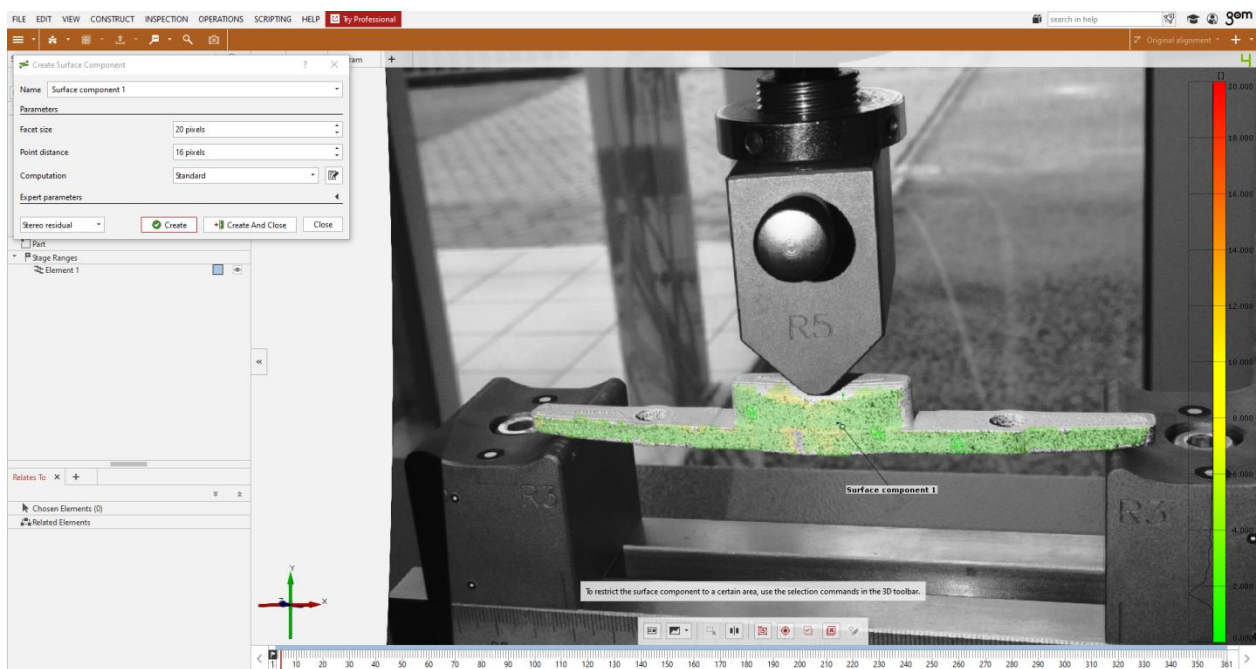
Ispitni uzorci su u sklopu statičkog ispitivanja savojno opterećeni u tri točke. Opterećenje valjka je na sredini uzorka kako bi se simuliralo pritiskanje gumba kopče. Nakon pregleda i analize raspodjela deformacija nastalih statičkim ispitivanjem na uzorcima radit će se redizajniranje kopče s ciljem poboljšavanja svojstava. Korišten je mjerni sustav ARAMIS s optičkim skenerom ATOS Core 200 sinkroniziran s kidalicom Hegewald & Peschke Inspekt table 20. Korišteni postav za statičko ispitivanje je moguće vidjeti na slici 5.2.

Korišteni parametri kidalice su:

- Razmak između oslonaca 123,00 mm, lijevo od ishodišta 61,00 mm, desno 62,00 mm
- Promjer oslonaca donje čeljusti iznosi 6,00 mm
- Promjer valjka za opterećivanje s gornje čeljusti iznosi 10,00 mm
- Brzina vertikalnog hoda je 0,50 mm/s
- Brzina praznog hoda iznosi 10,00 mm/s
- Akvizicija podataka pomaka i sile svakih 20 ms
- Opterećenje silom do loma uzorka

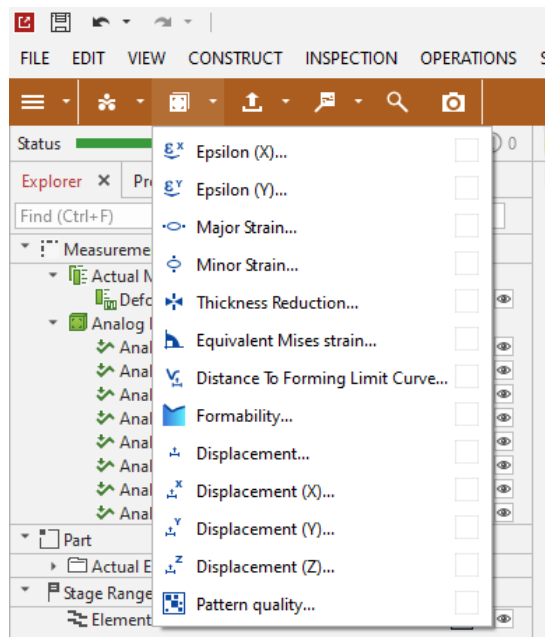
6.3.1. Postupak ispitivanja

Prije samog ispitivanja potrebno je kalibrirati optički 3D skener te napraviti pripremu uzorka kako je opisano u poglavlju 5.1. Započinje se nova mjerna serija te se odabire frekvencija snimanja uzoraka od 2 Hz. U postavkama programa ARAMIS Professional 2020 odabire se opcija „Create Surface Component“. U ponuđenim opcijama se odabire veličina fasete od 20 piksela te udaljenost između točaka od 16 piksela. To znači da svaka faseta na uzorku ima dimenzije 20 x 20 piksela te da susjedne fasete imaju 4 preklapajuća piksela. Odabrane postavke kao i procjena kvalitete stohastičkog uzorka na površini se vide na slici 6.30.



Slika 6.30: Postavke za stvaranje površinske komponente te prikaz kvalitete stohastičkog uzorka.

Nakon stvaranja površinske komponente moguće je raditi mjerenja poput polja pomaka i raspodjela deformacija u svim koordinatnim osima. Mogućnosti mjerenja su prikazane na slici 6.31. Osim ponuđenih opcija, moguće je mjeriti brzinu i ubrzanje po svim osima. Sva mjerenja su rađena u odnosu na prvu početnu referentnu snimku uzorka snimljenu netom prije djelovanja opterećenja na uzorak.

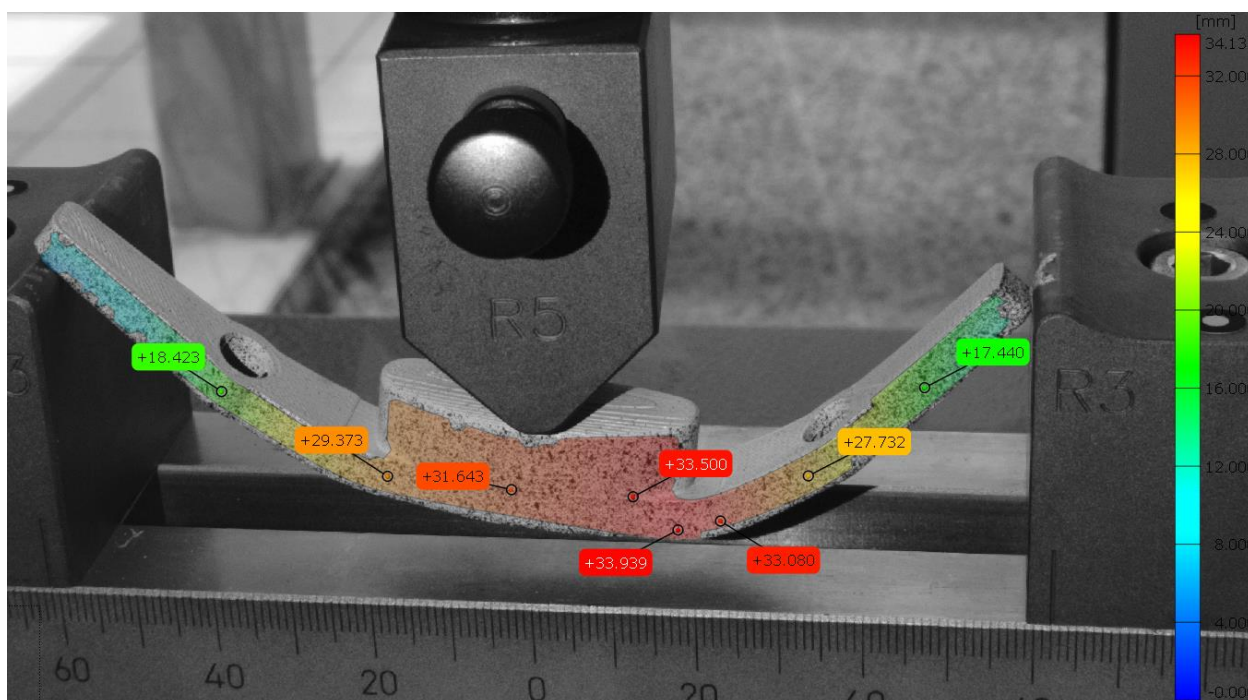


Slika 6.31: Ponuđene mogućnosti mjerenja.

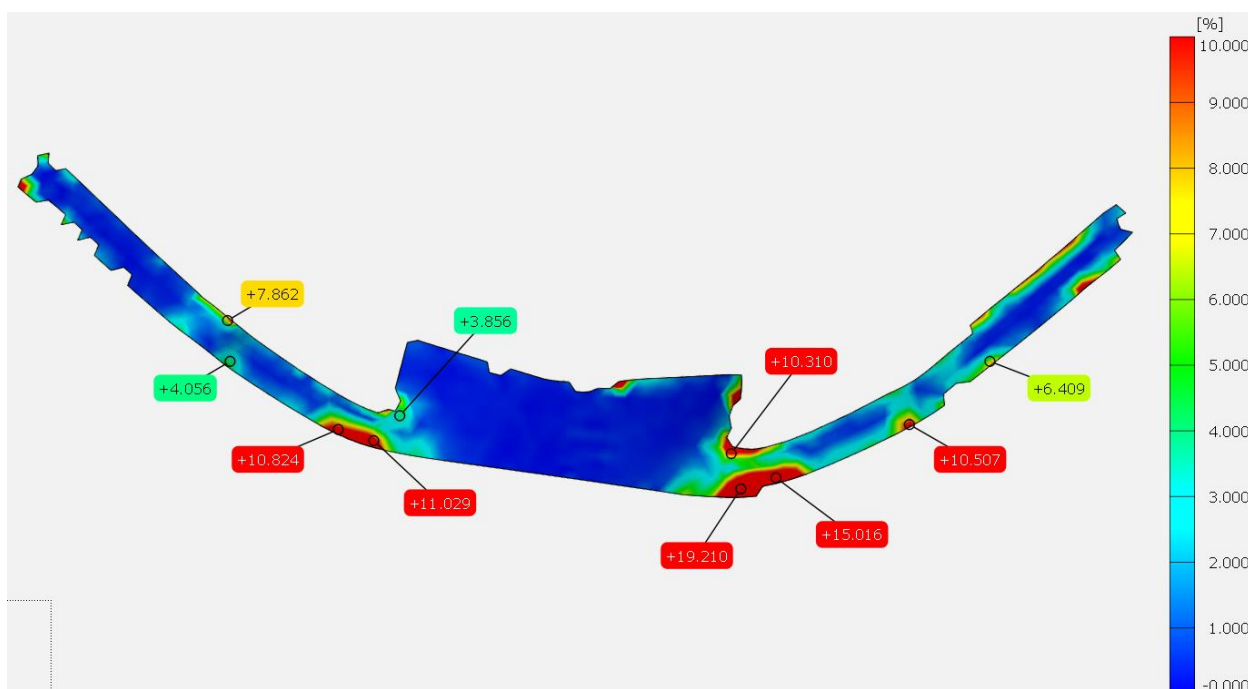
6.3.2. Rezultati ispitivanja

Ispitivanje na savijanje u tri točke je provedeno na devet uzoraka, po tri uzorka od svakog ispitanog materijala. Zbog tehničkih poteškoća prilikom ispitivanja uzorka od Z-ABS materijala, ispitivanje na jednom uzorku je zaustavljeno te stoga rezultati tog uzorka neće biti mjerodavni.

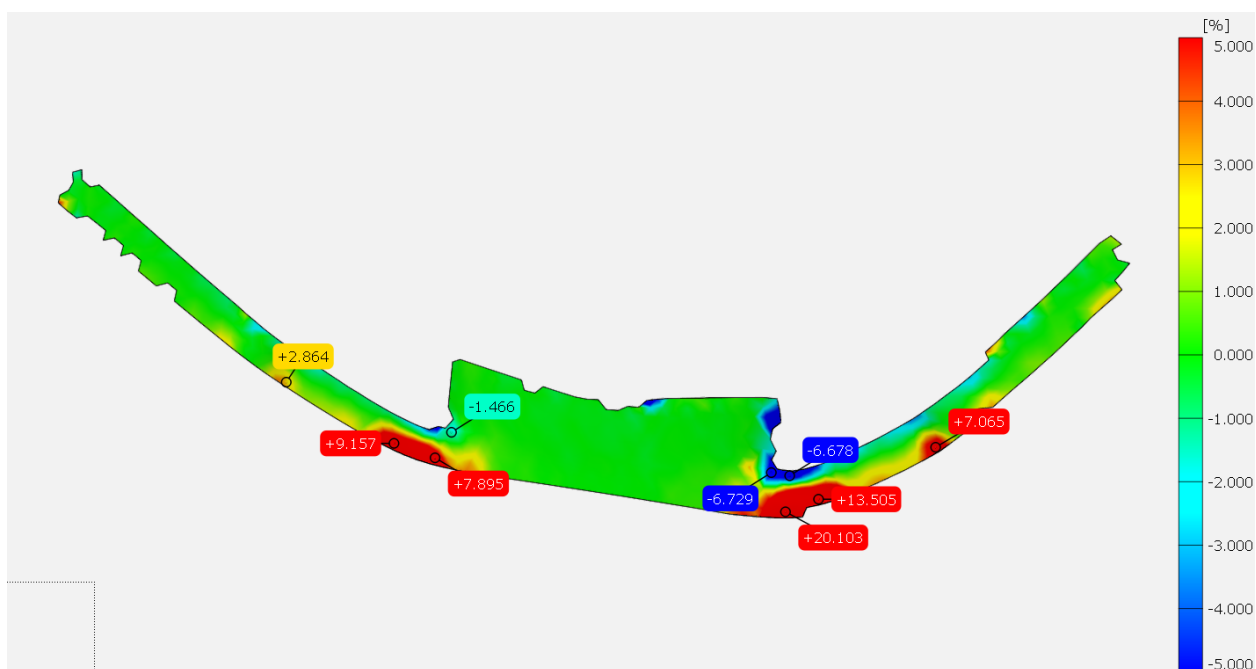
Dva ispitna uzorka od Z-ABS materijala pod utjecajem opterećenja ne pucaju već zbog pomaka iskaču s oslonaca. Vidljivi su okomiti znakovi naprezanja nastali plastičnim deformiranjem na spoju gumba kopče s tijelom. Vizualnim pregledom nisu ustanovljeni lomovi niti znakovi raslojavanja (razdvajanja 3D ispisanih slojeva) s unutarnje strane kopče. Na sljedećim slikama se nalaze rezultati mjerenja od Z-ABS materijala dobivenih iz programa ARAMIS Professional 2020 i LabMaster (slike 6.32, 6.33, 6.34, 6.35, 6.36 i 6.37).



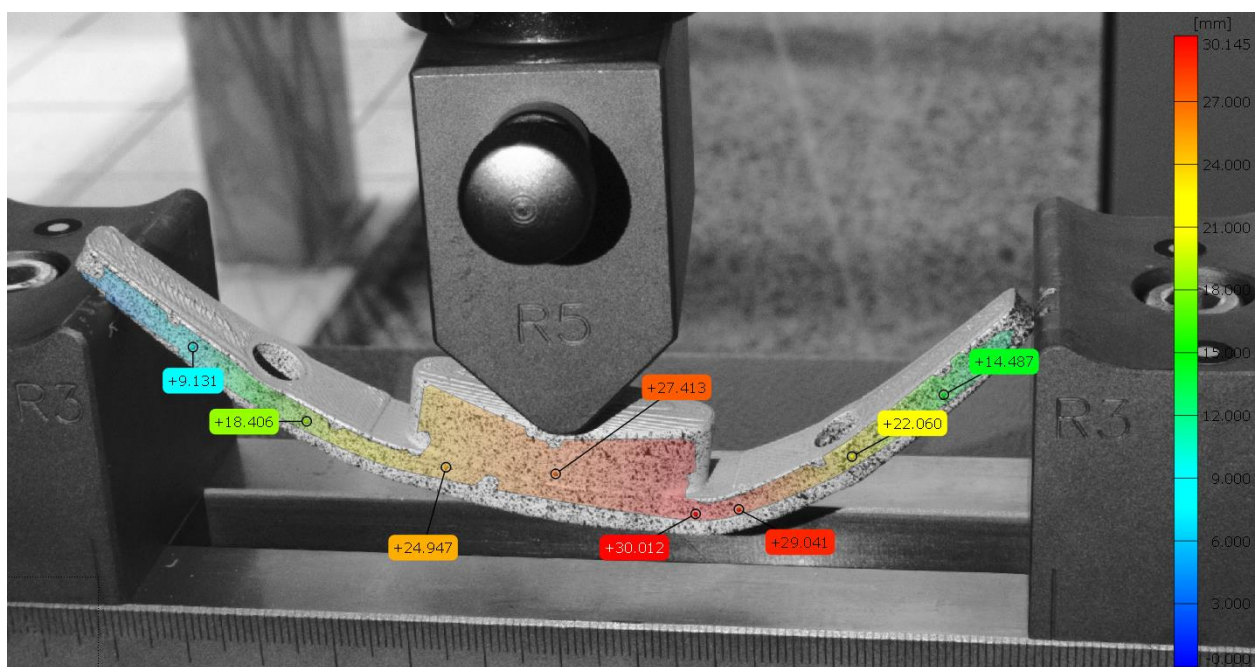
Slika 6.32: Prikaz ukupnog polja pomaka za prvi uzorak od Z-ABS materijala.



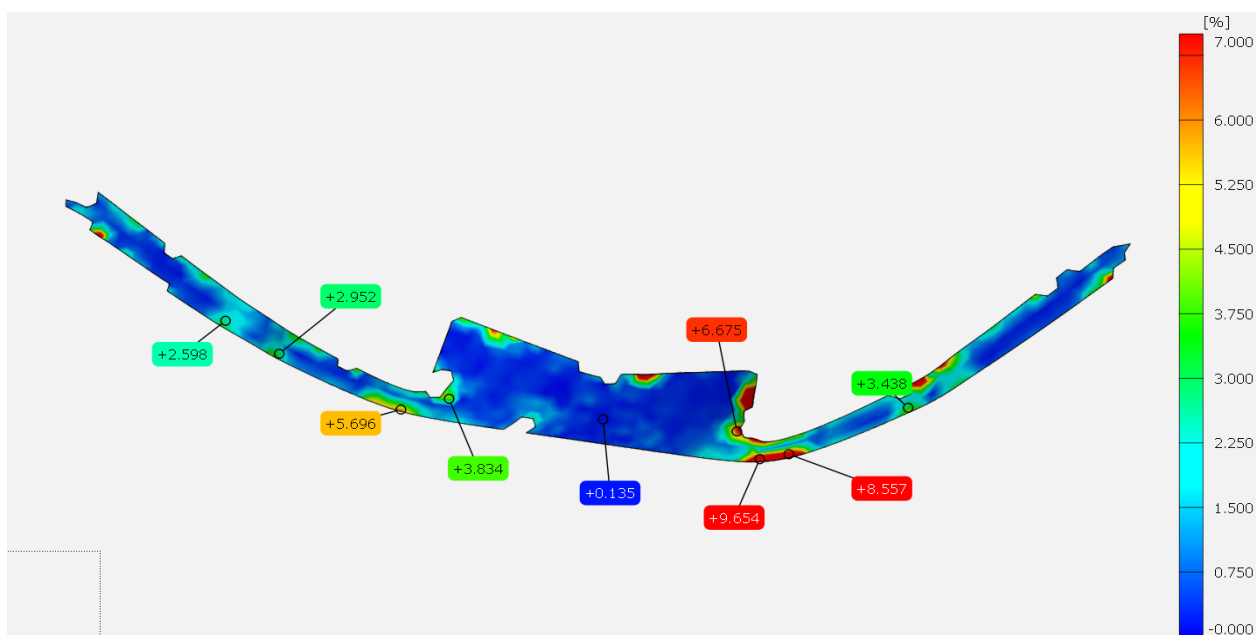
Slika 6.33: Prikaz raspodjele deformacija za prvi uzorak od Z-ABS materijala.



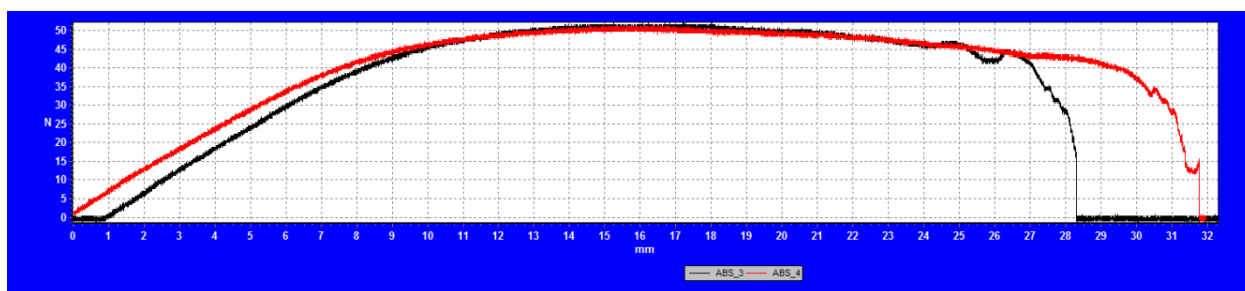
Slika 6.34: Prikaz raspodjele deformacija po Y osi za prvi uzorak od Z-ABS materijala.



Slika 6.35: Prikaz ukupnog polja pomaka za drugi uzorak od Z-ABS materijala.



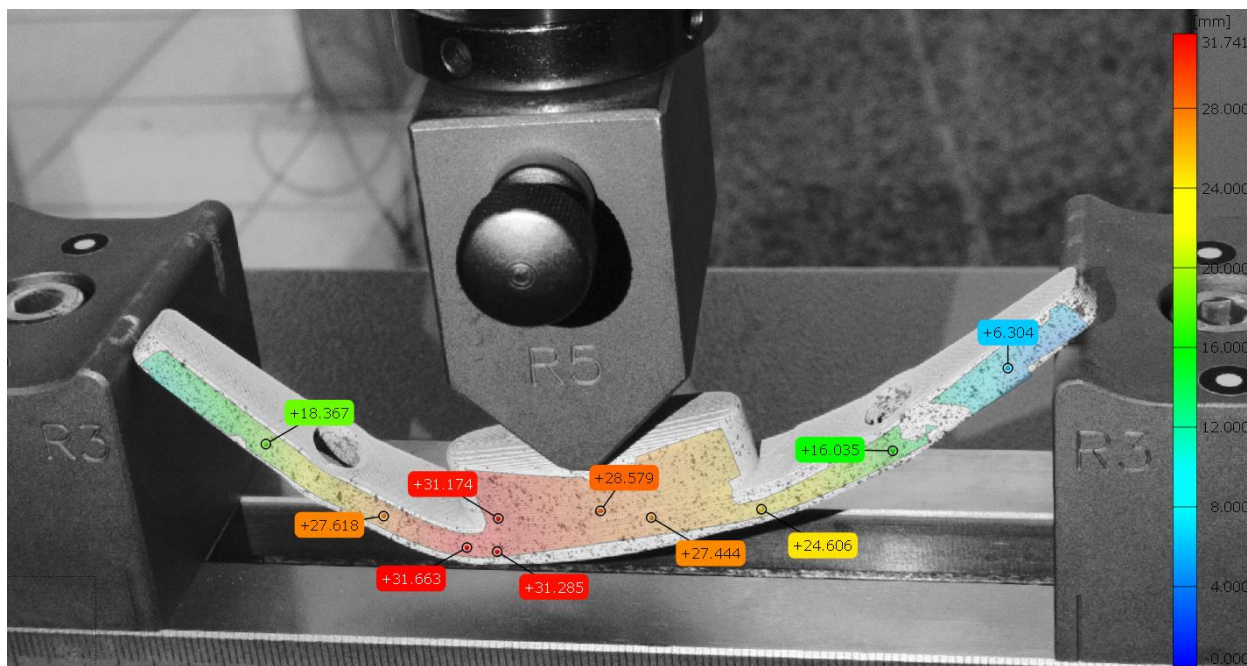
Slika 6.36: Prikaz raspodjele deformacija za drugi uzorak od Z-ABS materijala.



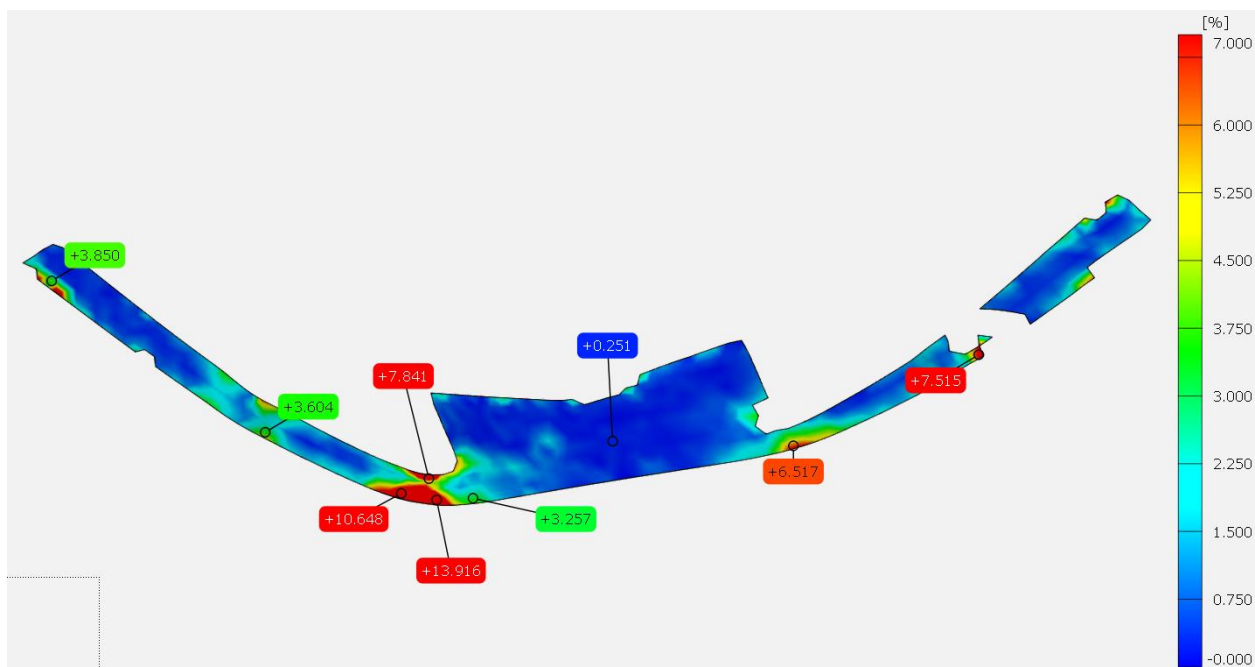
Slika 6.37: Dijagram sila-pomak za oba uzorka od Z-ABS materijala.

Iz priloženih slika raspodjela deformacija je vidljivo zašto dolazi do plastične deformacije na području spoja gumba i tijela kopče. Iz dijagrama sa slike 6.37 je vidljivo maksimalno postignuto opterećenje u iznosu od 51,00 N. Analizom dijagrama se može vidjeti izlazak oba uzorka iz elastičnog područja nakon pomaka od 6,00 mm po Y osi i opterećenja od 35,00 N. Daljnjim povećanjem sile nastaju plastične deformacije na spomenutom području. Vidljivo je klizanje prvog uzorka s oslonaca nakon pomaka po Y osi od 27,50 mm te drugog nakon 32,00 mm.

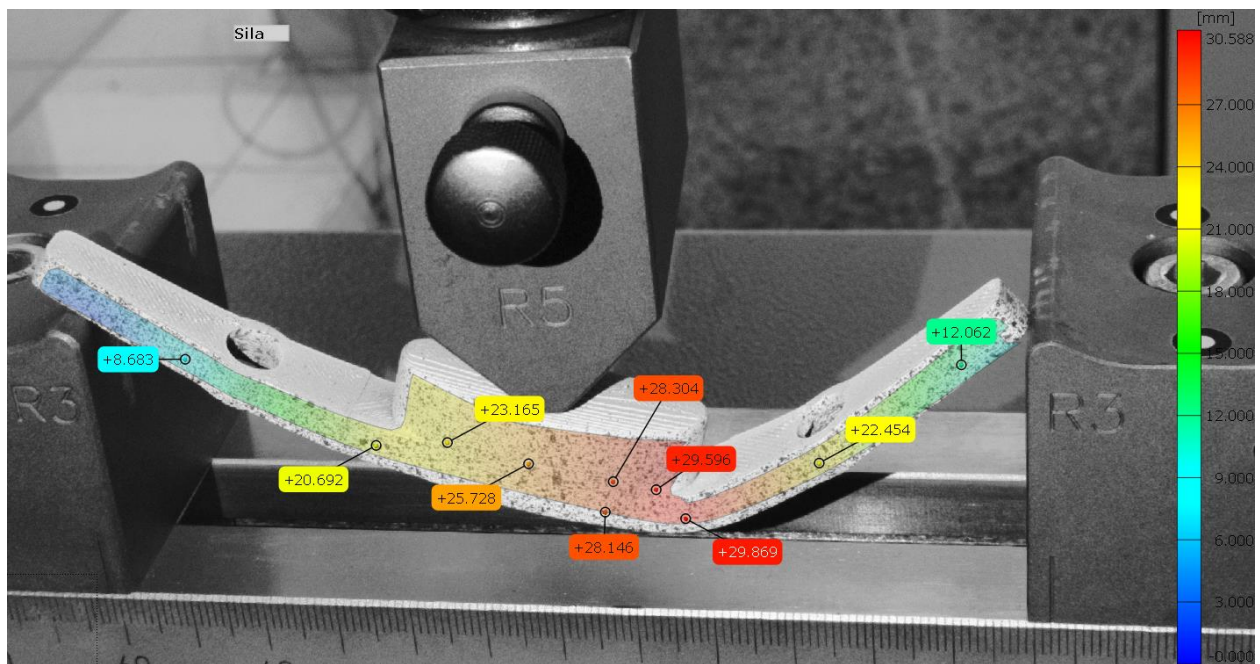
Sljedeća tri ispitna uzorka su proizvedena od Z-ASA Pro materijala. Vizualnim pregledom ustanovljena su raslojavanja na spoju gumba i tijela kopče. Vidljivi su okomiti znakovi naprezanja na istom području kao i kod uzoraka od Z-ABS materijala. Uzorci se nisu slomili već je došlo do klizanja uzorka s oslonaca. Rezultati su vidljivi na slikama 6.38, 6.39, 6.40, 6.41, 6.42, 6.43 i 6.44.



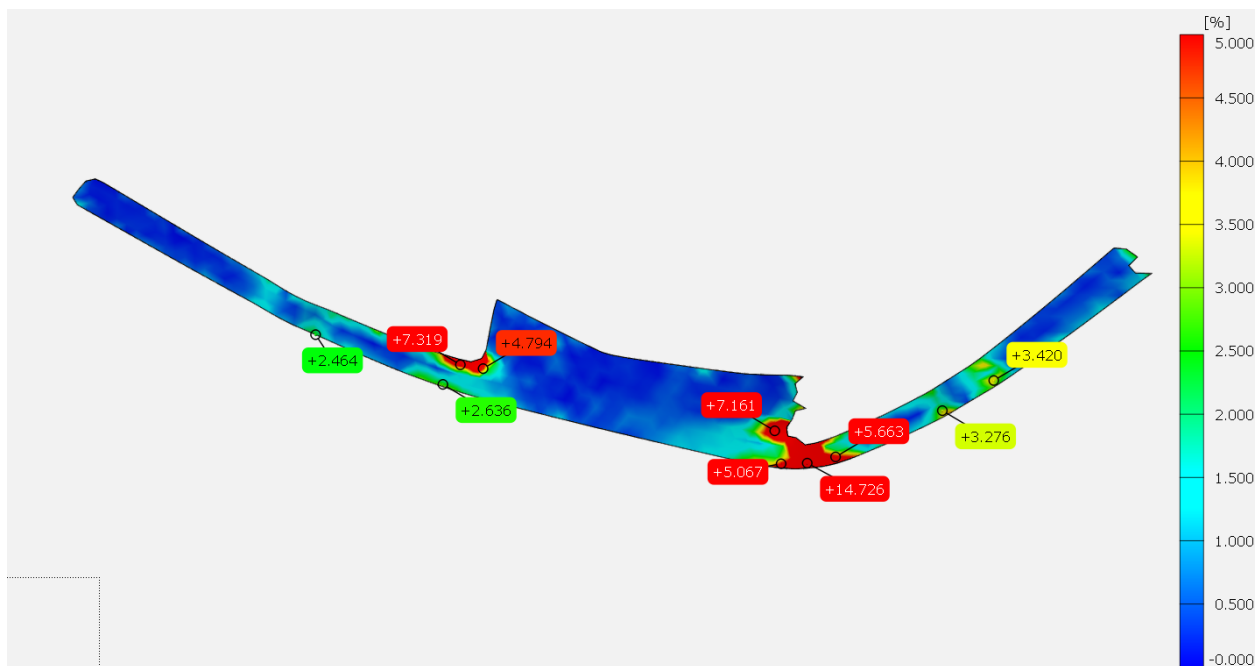
Slika 6.38: Prikaz ukupnog polja pomaka za prvi uzorak od Z-ASA Pro materijala.



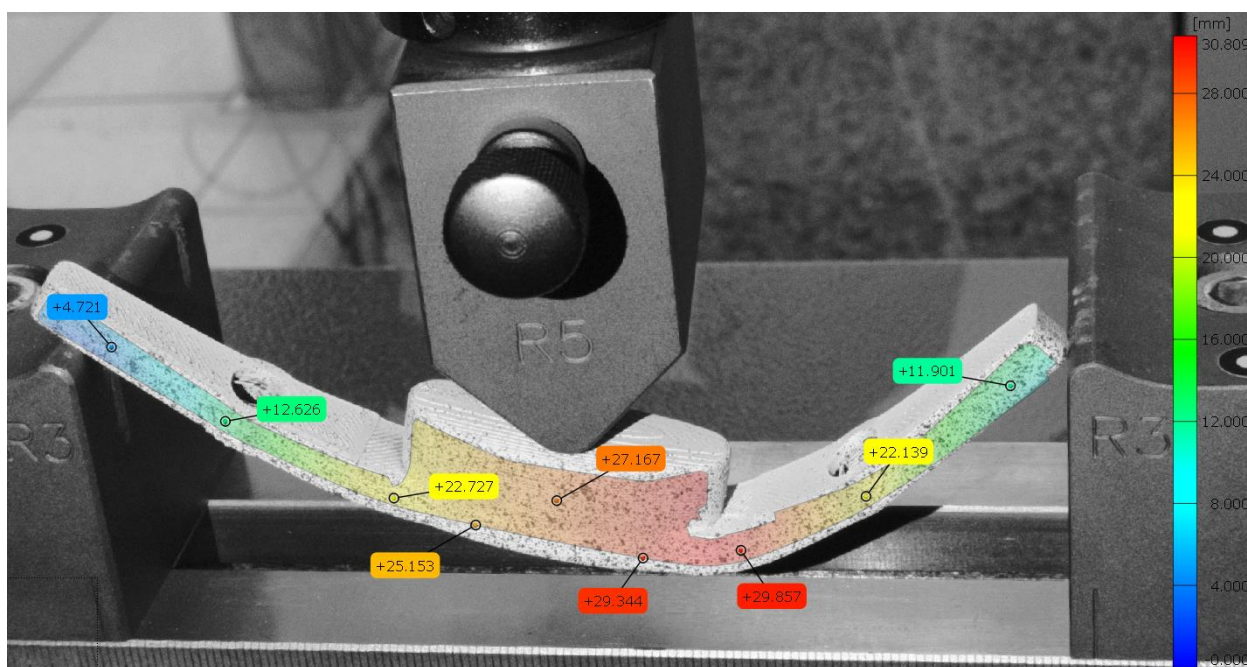
Slika 6.39: Prikaz raspodjele deformacija za prvi uzorak od Z-ASA Pro materijala.



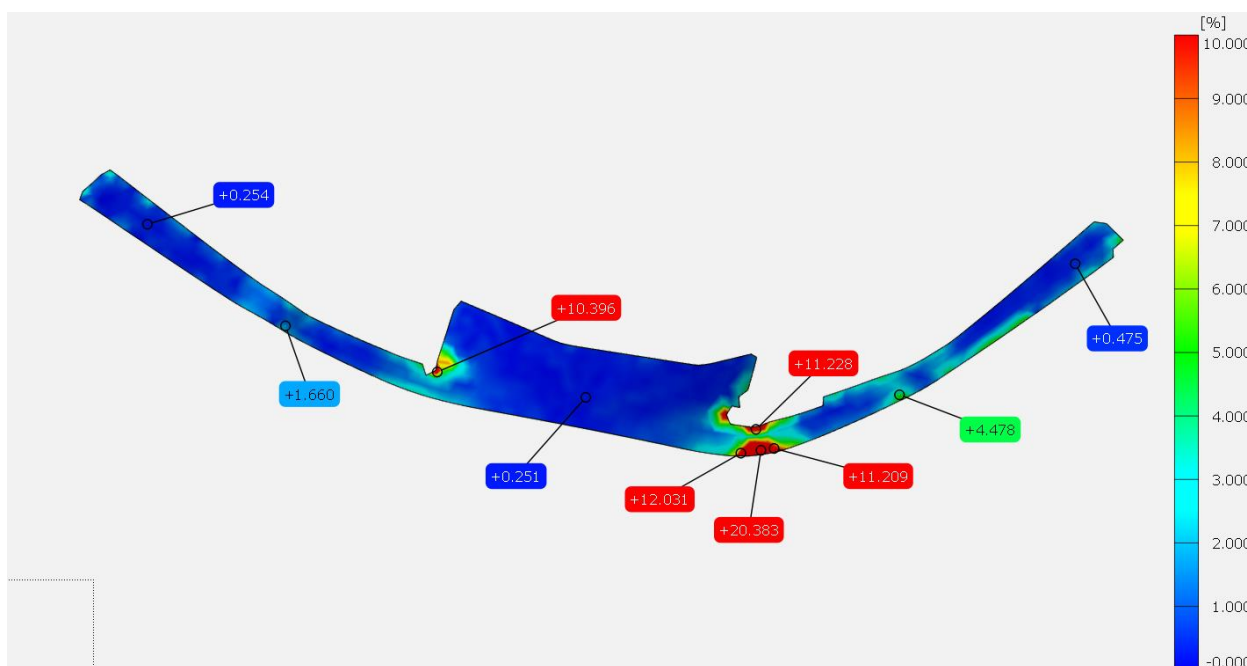
Slika 6.40: Prikaz ukupnog polja pomaka za drugi uzorak od Z-ASA Pro materijala.



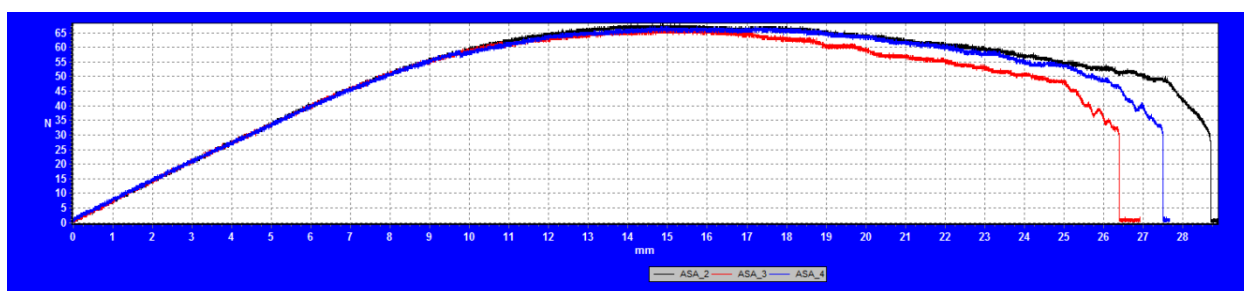
Slika 6.41: Prikaz raspodjele deformacija za drugi uzorak od Z-ASA Pro materijala.



Slika 6.42: Prikaz ukupnog polja pomaka za treći uzorak od Z-ASA Pro materijala.



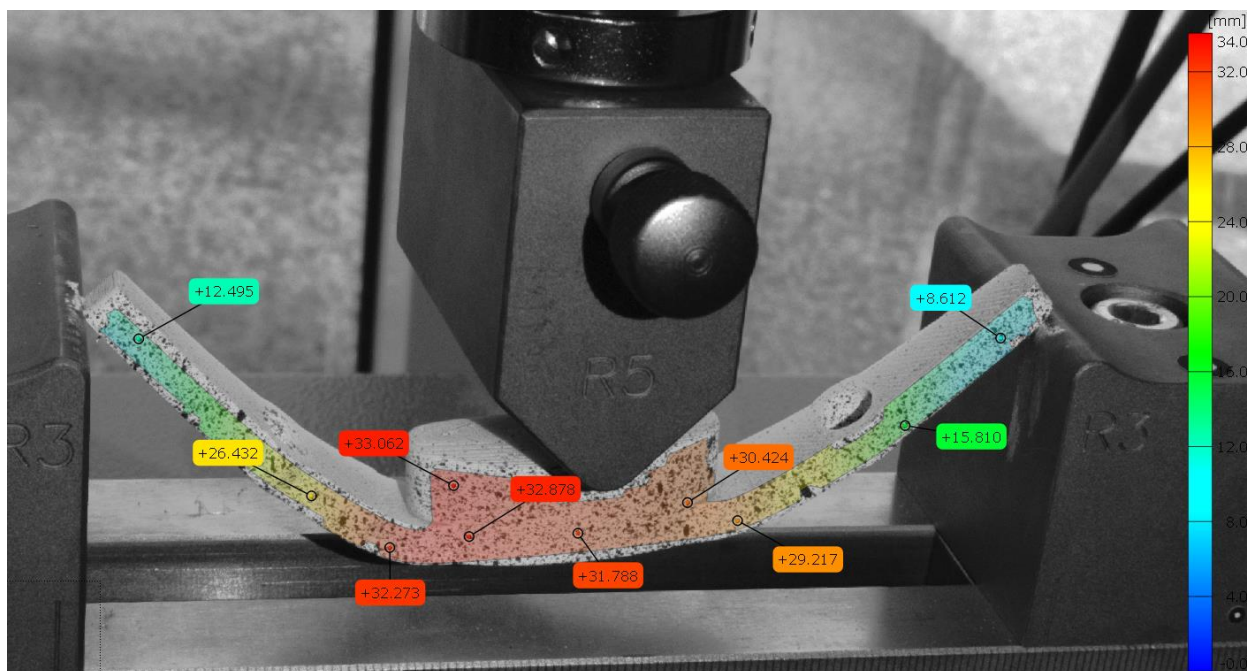
Slika 6.43: Prikaz raspodjele deformacija za treći uzorak od Z-ASA Pro materijala.



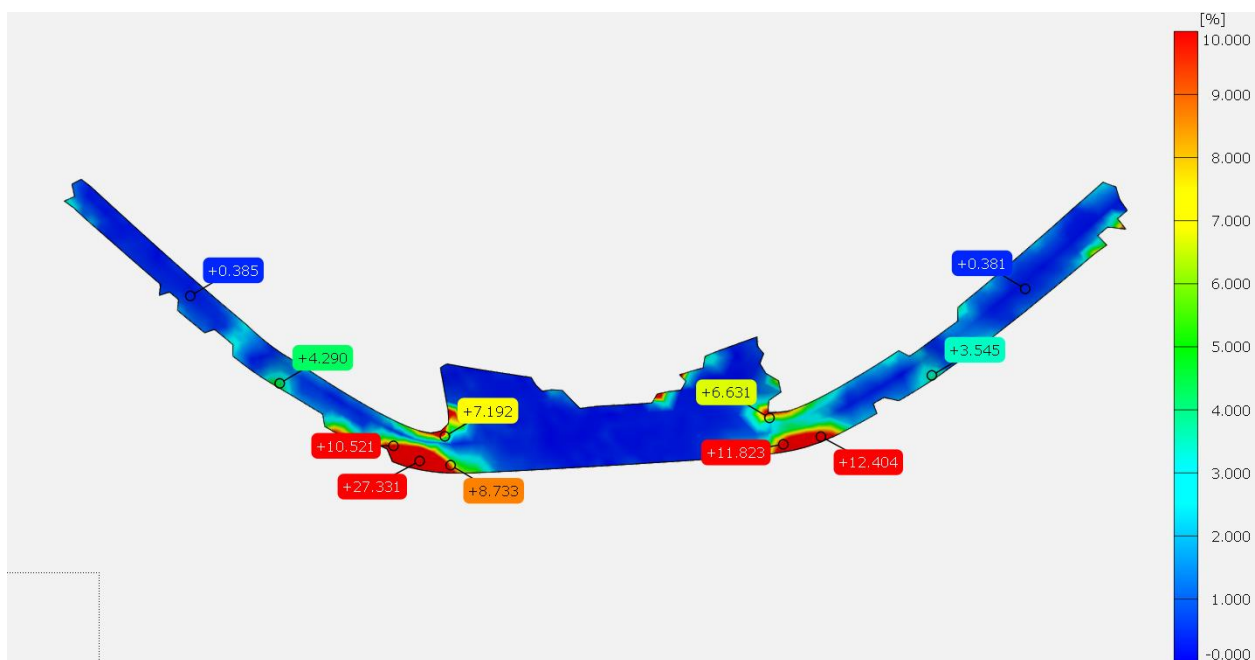
Slika 6.44: Dijagram sila-pomak za sva tri uzorka od Z-ASA Pro materijala.

Prethodne slike prikazuju isto mjesto koncentracije deformacija za sva tri ispitna uzorka kao i kod uzoraka od Z-ABS materijal. Na dijagramu je vidljiva najveća postignuta sila od 67,50 N. Sva tri uzorka imaju isto elastično područje koje postepeno prelazi u plastično nakon pomaka od 8,00 mm i opterećenja od 50,00 N. Iz dijagrama se također može iščitati pomak pri kojem su uzorci iskliznuli s oslonaca, vrijednosti su 28,75 za prvi uzorak, 26,50 mm za drugi uzorak te 27,50 mm za treći ispitani uzorak.

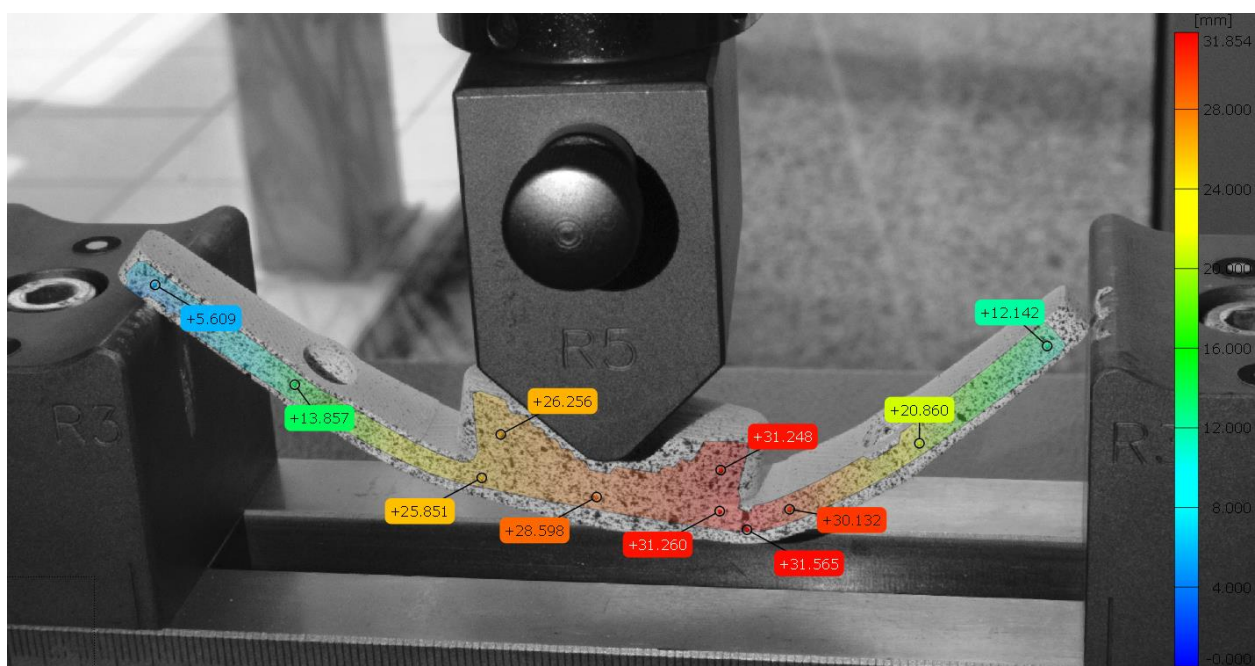
Sljedeći ispitni uzorci su od Z-ULTRAT materijala. Sva tri uzorka imaju okomite znakove naprezanja nastala plastičnom deformacijom na području spoja gumba i tijela kopče. Nema lomova niti raslojavanja između slojeva. Uzorci su također iskliznuli s oslonaca nakon većeg pomaka. Rezultati mjerenja su na slikama 6.45, 6.46, 6.47, 6.48, 6.49, 6.50 i 6.51.



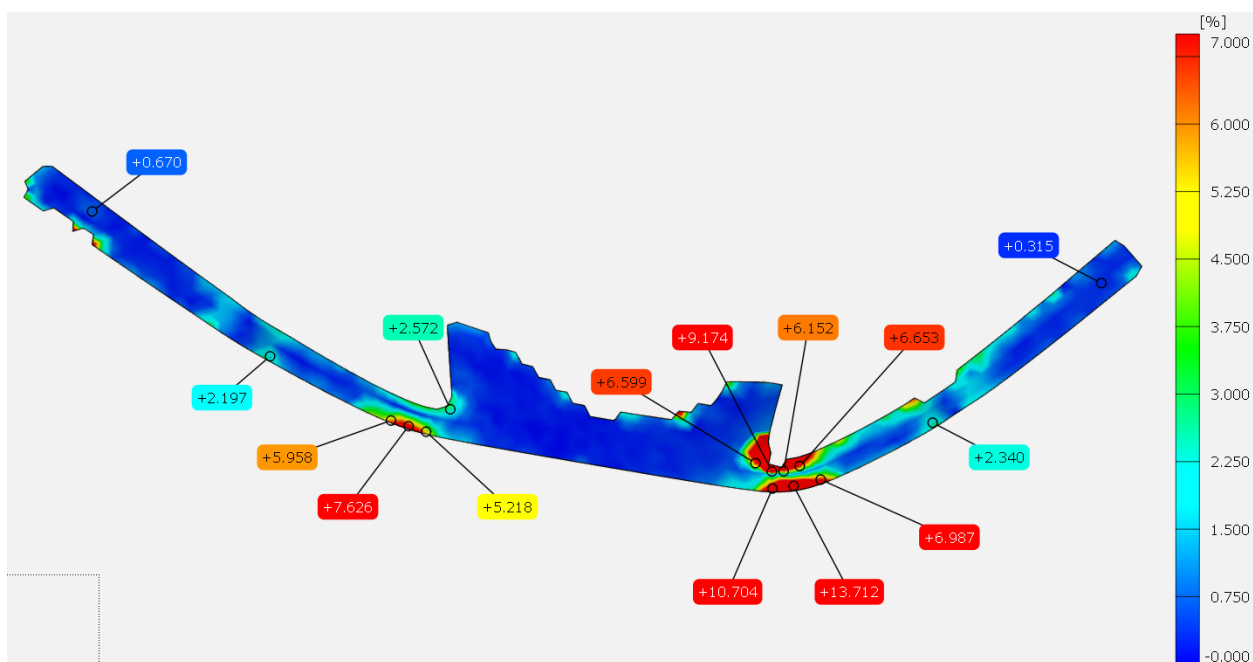
Slika 6.45: Prikaz ukupnog polja pomaka za prvi uzorak od Z-ULTRAT materijala.



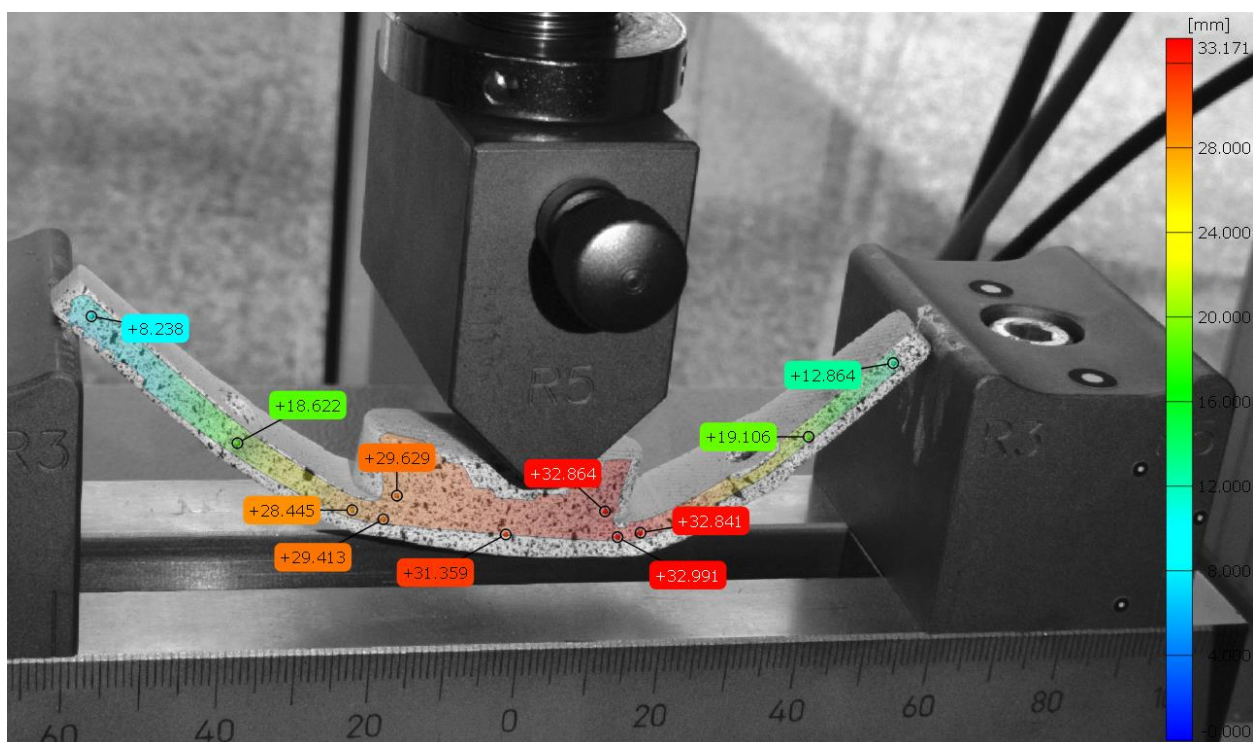
Slika 6.46: Prikaz raspodjele deformacija za prvi uzorak od Z-ULTRAT materijala.



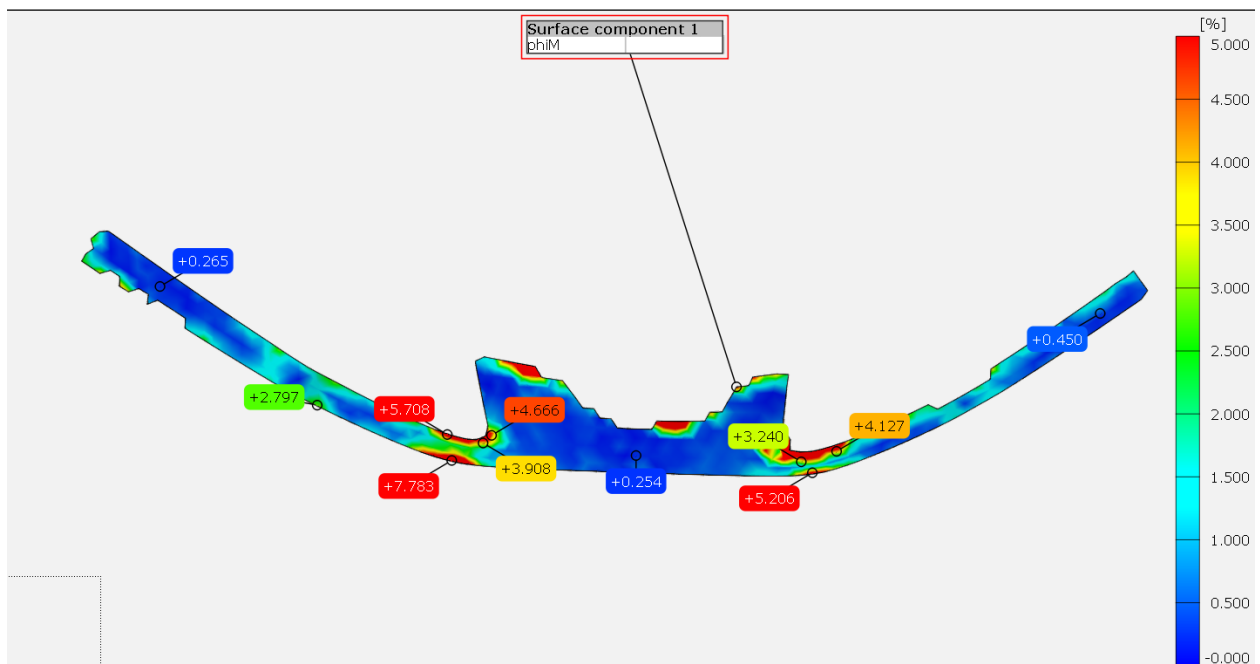
Slika 6.47: Prikaz ukupnog polja pomaka za drugi uzorak od Z-ULTRAT materijala.



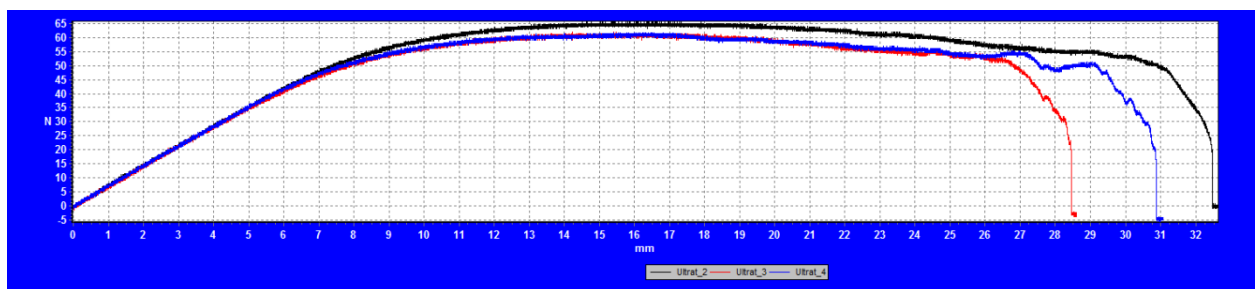
Slika 6.48: Prikaz raspodjele deformacija za drugi uzorak od Z-ULTRAT materijala.



Slika 6.49: Prikaz ukupnog polja pomaka za treći uzorak od Z-ULTRAT materijala.



Slika 6.50: Prikaz raspodjele deformacija za treći uzorak od Z-ULTRAT materijala.



Slika 6.51: Dijagram sila-pomak za sva tri uzorka od Z-ULTRAT materijala.

Iz rezultata je vidljivo da se ispitni uzorci od Z-ULTRAT materijala pri savijanju u tri točke ponašaju jednako kao i ostali uzorci od različitih materijala. Mjesto najvećih deformacija je spoj gumba i tijela kopče gdje su okom vidljive plastične deformacije. Prvi uzorak ima najveću postignutu silu u iznosu od 65,00 N, dok drugi i treći uzorak imaju najveće postignuto opterećenje u iznosu od 60,00 N. Sva tri uzorka imaju područje elastične deformacije do opterećenja od 47,50 N i pomaka od 7,00 mm po Y osi. Prvi uzorak je iskliznuo s oslonaca pri pomaku od 32,50 mm, drugi pri 28,50 mm i treći pri 30,85 mm.

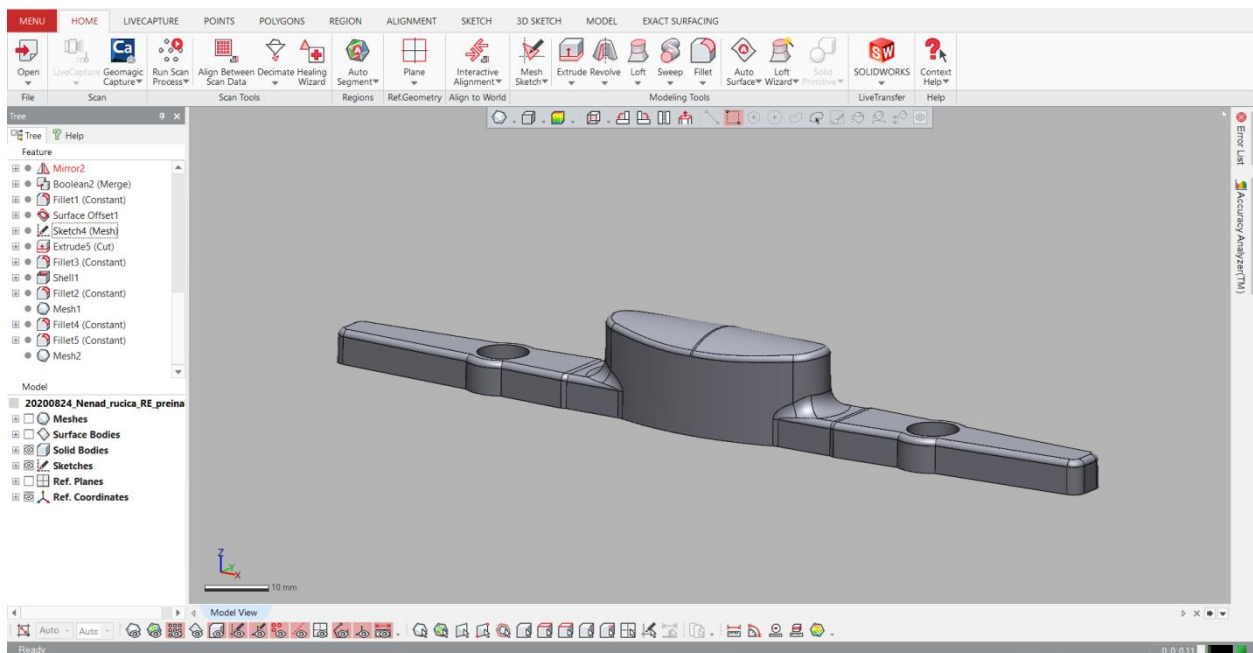
7. PREINAKA DIZAJNA KOPČE

Na temelju dobivenih rezultata iz statičkog ispitivanja, vidljivo je da svi ispitni uzorci imaju isto područje, odnosno „slabu točku“ na kojem se najviše deformira. To područje se nalazi na spoju gumba i tijela kopče ručke. Na istom mjestu u slučaju uzoraka od Z-ASA Pro materijala dolazi i do razdvajanja izrađenih slojeva. Iz tog razloga se pristupa redizajnu same kopče.

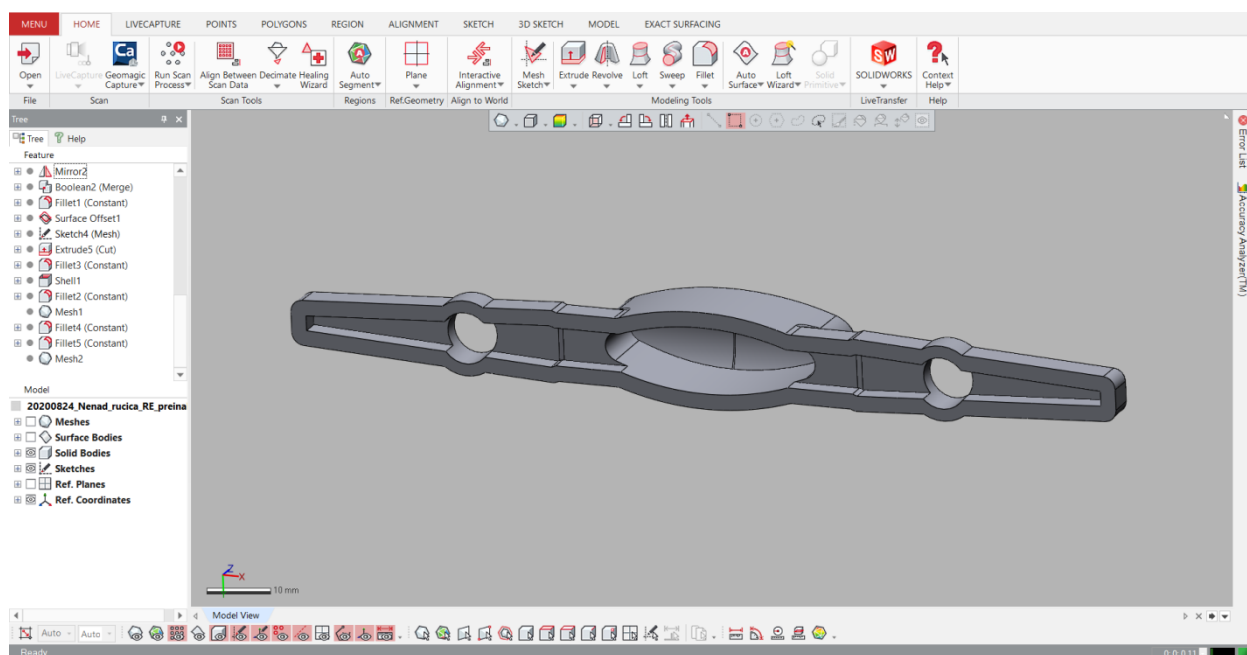
7.1. Redizajn u Geomagic Design X

Za redizajn kopče korištene su samo dvije preinake koje bi mogle poboljšati njena svojstva prilikom statičkog ispitivanja. Prva preinaka je postavljanja zaobljenja, odnosno fileta na sam spoj gumba i tijela kopče. Pretpostavka je da će se opterećenje rasporediti jednoliko po većoj površini tijela kopče te da neće dolaziti do plastičnog deformiranja na tom području. Druga preinaka je podebljanje stijenke cijele kopče ručke za 0,75 milimetara.

Pristupamo postupku redizajna u softveru korištenom za povratno inženjerstvo, Geomagic Design X-u. Na već postojećem CAD modelu naredbom „*Fillet*“ označavamo spoj tijela i gumba te postavljamo radijus u iznosu od 3 milimetra. Druga preinaka se radi naredbom „*Shell*“. S obzirom da je ta naredba već korištena za izradu prve inačice kopče, pristupamo izmjeni postojećih dimenzija. U opciji „*Shell*“ dimenzija stijenke se mijenja s 1,75 mm na 2,50 mm. Izgled redizajnirane kopče se može vidjeti na slikama 7.1 i 7.2.



Slika 7.1: Prikaz redizajna kopče s zaobljenim spojem gumba i tijela kopče.



Slika 7.2: Prikaz redizajna kopče s donje strane s vidljivim zadebljanjem stijenke.

7.2. Aditivna izrada redizajnirane kopče

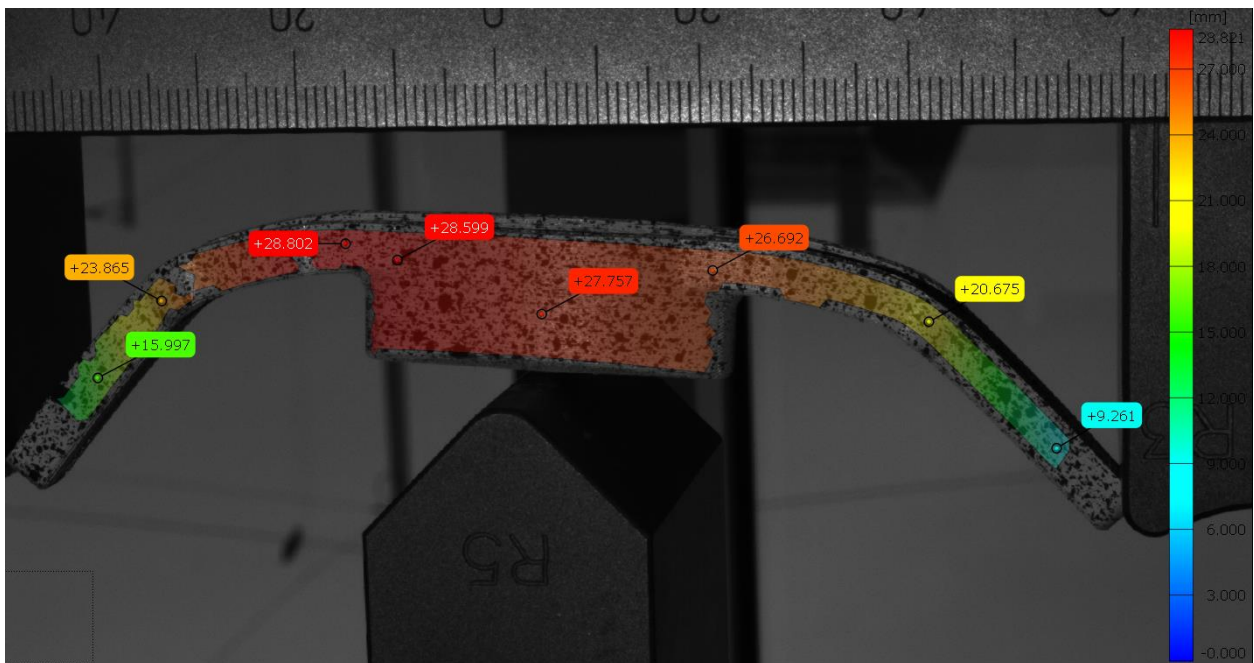
Preinačena kopča se sprema na SD karticu u STL obliku i stavlja u 3D pisac Zortrax M200 na izradu. Izrađuje se ukupno devet primjeraka, tri primjerka od tri materijala: Z-ABS, Z-ASA Pro i Z-ULTRAT. Dva izrađena primjerka od svakog materijala će se koristiti za statička ispitivanja. Primjerci od Z-ABS i Z-ULTRAT materijala su uspješno izrađeni. Unatoč nekoliko pokušaja i nekoliko promjena postavki ispisa, uzorci od Z-ASA Pro materijala se nisu uspješno izradili. Donji slojevi kopče su se raslojavali i odvajali zajedno s podlogom. Iz tog razloga uzorci od tog materijala se neće koristiti za statička ispitivanja. U tablici 7.1 se može vidjeti procjena vremena, iskorištenog materijala i cijene izrade redizajniranog modela kopče.

Tablica 7.1: Usporedba podataka izrade redizajnirane kopče na 3D pisacu Zortrax M200.

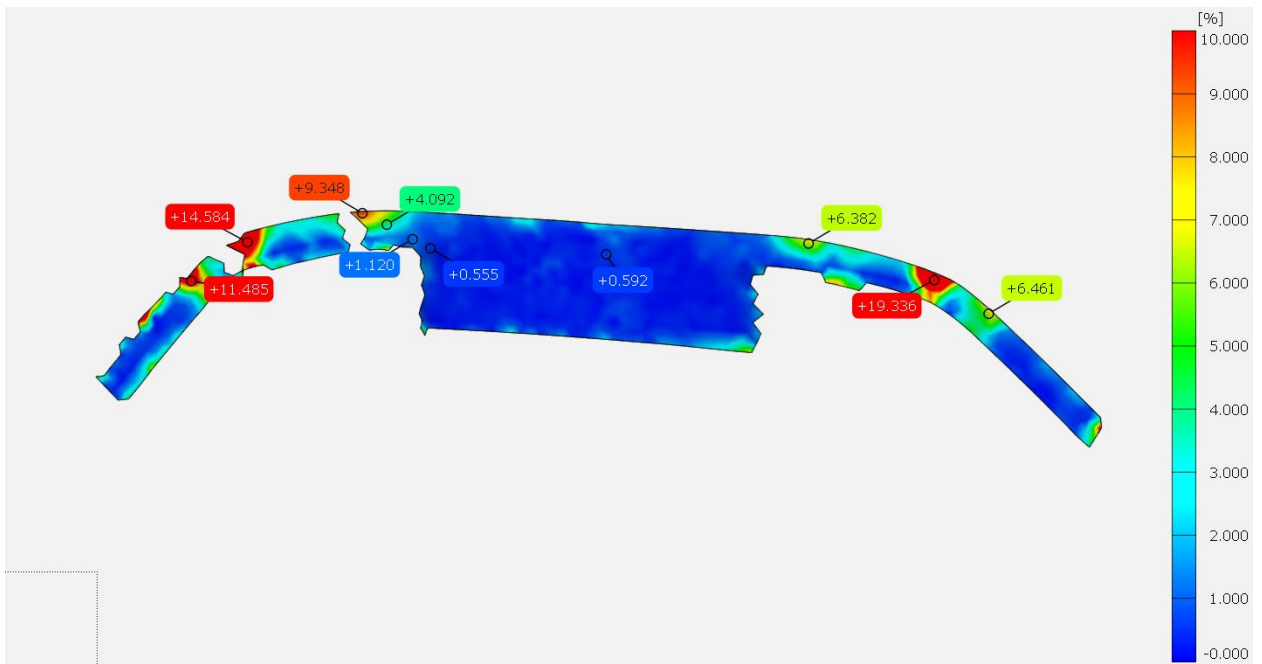
Materijal	Z-ABS	Z-ASA Pro	Z-ULTRAT
Vrijeme izrade za 1 komad	1 sat i 31 minuta	1 sat i 34 minute	1 sat i 31 minuta
Vrijeme izrade za 3 komada	4 sata i 26 minuta	4 sata i 33 minute	4 sata i 28 minuta
Količina materijala za 1 komad	12 grama	14 grama	12 grama
Količina materijala za 3 komada	33 grama	40 grama	33 grama
Cijena izrade 1 komada	4,20 HRK	7,42 HRK	6,36 HRK
Cijena izrade 3 komada	11,55 HRK	21,20 HRK	17,49 HRK

7.3. Statičko ispitivanje redizajnirane kopče

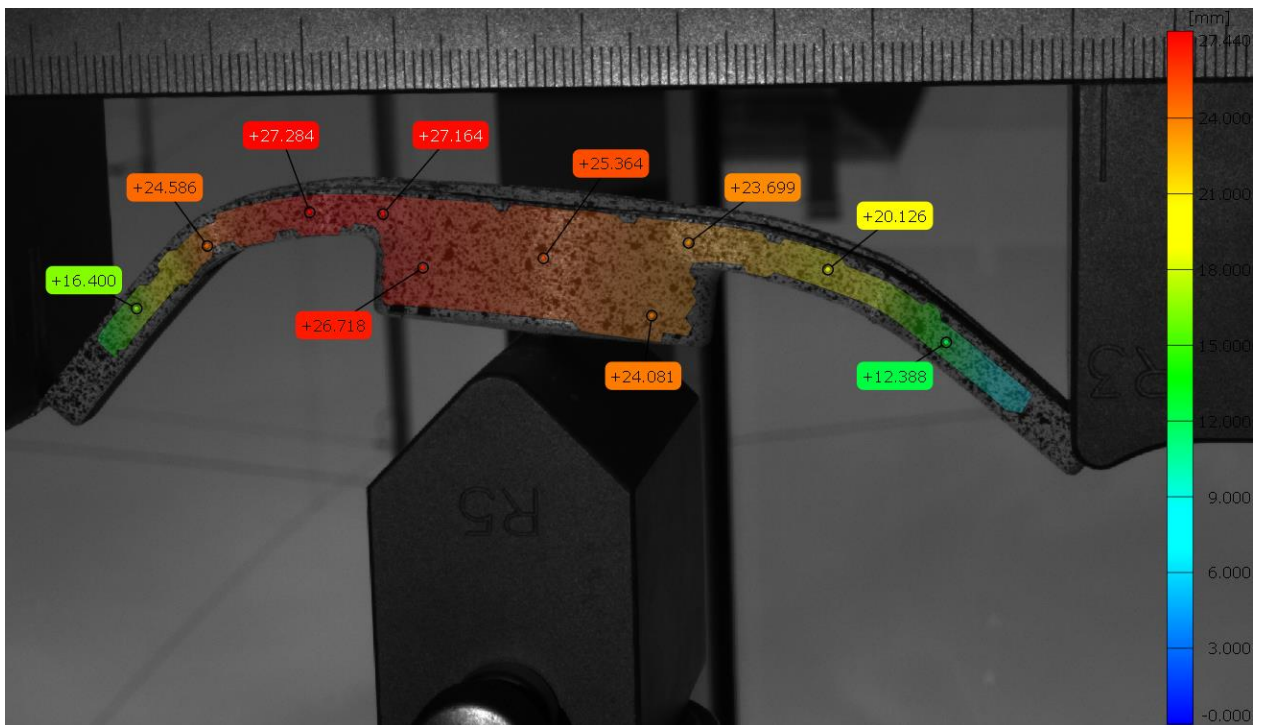
Ispitivanje na savijanje u tri točke izvršeno je istim postupkom i s istim parametrima kao što je opisano u poglavlju 6.3. Zbog neuspješne aditivne izrade kopče od Z-ASA Pro materijala, iste nisu uključene u daljnje ispitivanje. Ispitana su 2 uzorka od Z-ABS i 2 uzorka od Z-ULTRAT materijala. Redizajn kopče je ispunio svoju svrhu, sporna „slaba točka“ na spoju gumba i tijela kopče više nije mjesto s najvećim plastičnim deformacijama. Iako nema plastičnih deformacija na tom spoju, vizualnim pregledom se ustanovljuje da se područje s najvećim deformacijama sada nalazi na najtanjem poprečnom presjeku, odnosno na mjestu s izbušenim rupama. Međutim, plastične deformacije na tom mjestu nije moguće izbjeći jer su izbušene rupe tog promjera potrebne za funkcionalno aktiviranje sklopa ručke. Kod uzoraka od Z-ULTRAT materijala je došlo do loma na spomenutom području. S pojačanim stijenkama povećala se i krutost samog uzorka, osim loma na mjestu rupe, vizualno nema plastičnih deformacija na ostalim dijelovima uzorka. Uzorci od Z-ABS materijala nemaju lomova niti su vidljivi znakovi raslojavanja. Vizualnim pregledom je ustanovljeno blago plastično deformiranje na području najtanjeg presjeka, odnosno rupe. Na slikama 7.3, 7.4, 7.5, 7.6 i 7.7 su dobiveni rezultati za Z-ABS ispitne uzorke.



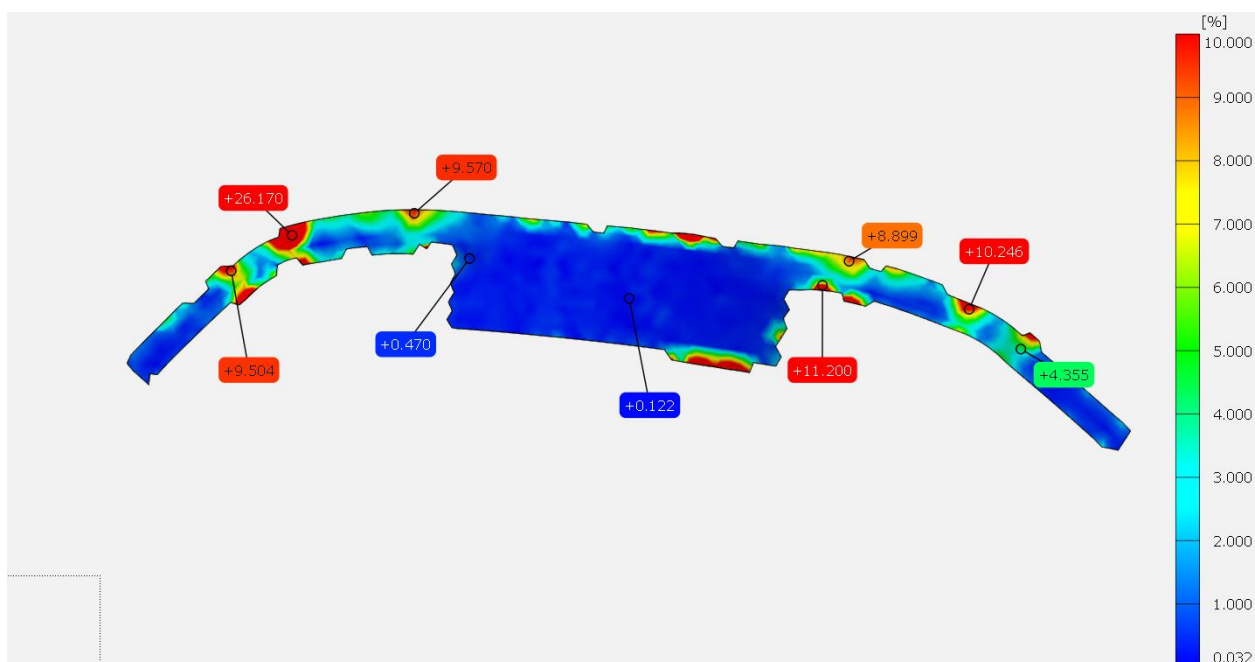
Slika 7.3: Prikaz ukupnog polja pomaka za prvi redizajnirani uzorak od Z-ABS materijala.



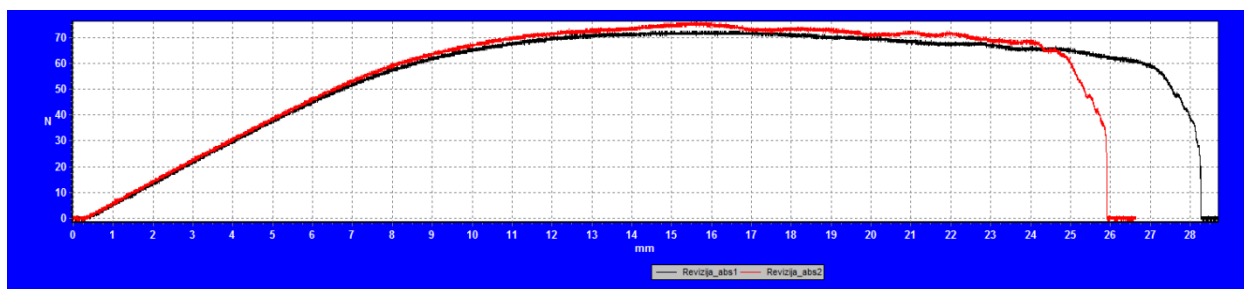
Slika 7.4: Prikaz raspodjele deformacija za prvi redizajnirani uzorak od Z-ABS materijala.



Slika 7.5: Prikaz ukupnog polja pomaka za drugi redizajnirani uzorak od Z-ABS materijala.



Slika 7.6: Prikaz raspodjele deformacija za drugi redizajnirani uzorak od Z-ABS materijala.

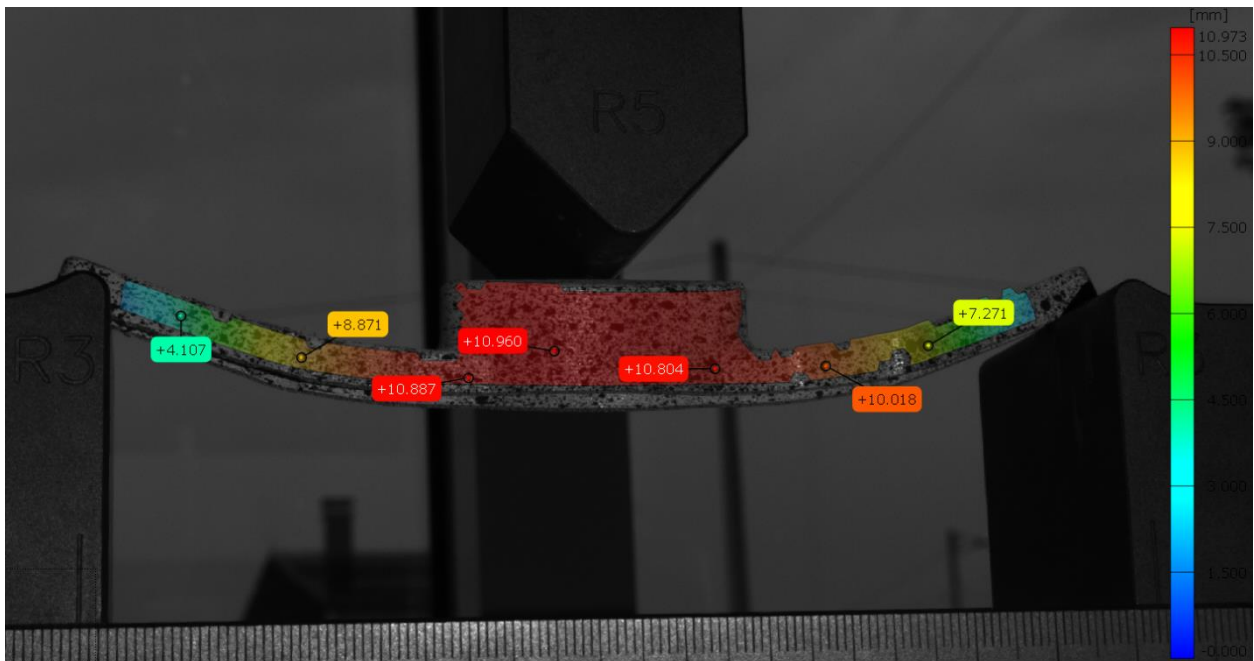


Slika 7.7: Dijagram sila-pomak za oba redizajnirana uzorka od Z-ABS materijala.

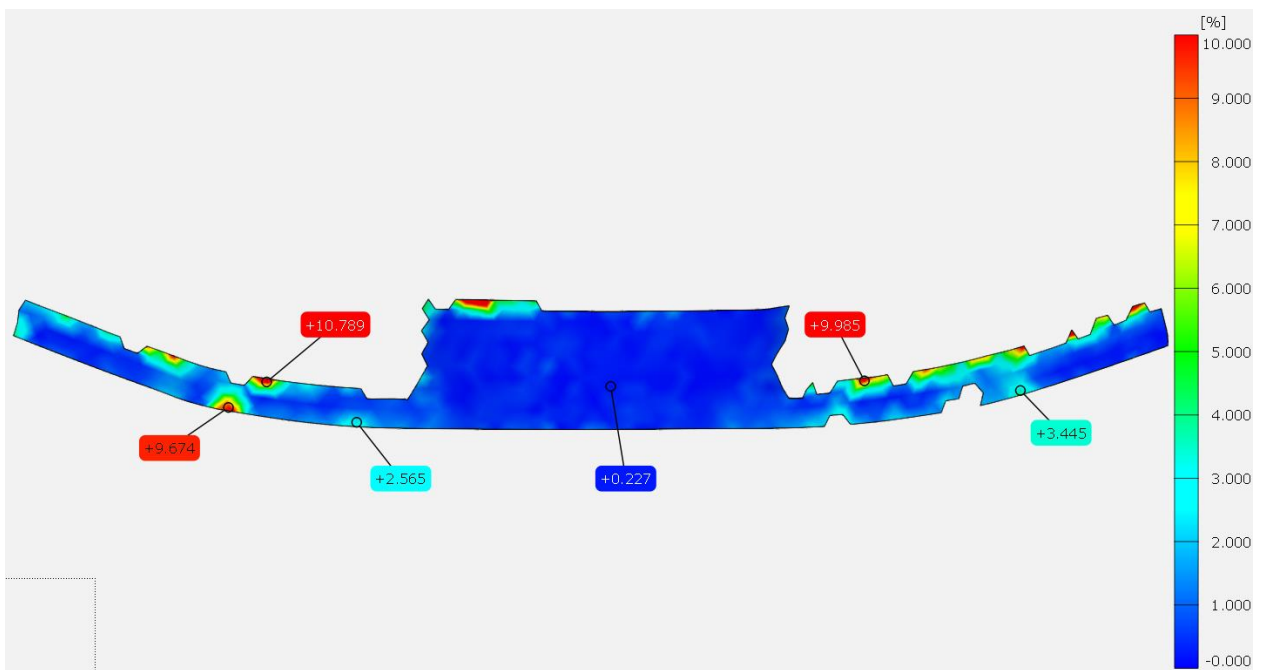
Na slikama 7.4 i 7.6 je vidljivo premještanje područja najvećeg deformiranja na područje oko rupe što samo potvrđuje već vizualno uočeno. Na dijagramu sa slike 7.7 se može vidjeti da elastično područje traje do sile od 60,00 N i pomaka po Y osi od 8,00 mm za oba ispitana uzorka. Prvi ispitani uzorak od Z-ABS materijala iskače s oslonaca pri 25,90 mm pomaka dok drugi uzorak iskače tek pri pomaku od 28,30 mm. Maksimalno opterećenje koje je bilo na prvom uzorku iznosi 72,00 N. Drugi ispitani uzorak je podnio opterećenje veće za 3,00 N, odnosno ukupnog iznosa od 75,00 N.

Iz ovih rezultata je moguće zaključiti da redizajnirani primjerci od Z-ABS materijala imaju daleko bolja svojstva nego primjerci prijašnjeg dizajna. Elastično područje je povećano ukupno za 2,00 mm pomaka i čak 25,00 N sile. Najveća sila koja je bila potrebna da bi se uzorci nastavili deformirati je povećana za 24,00 N.

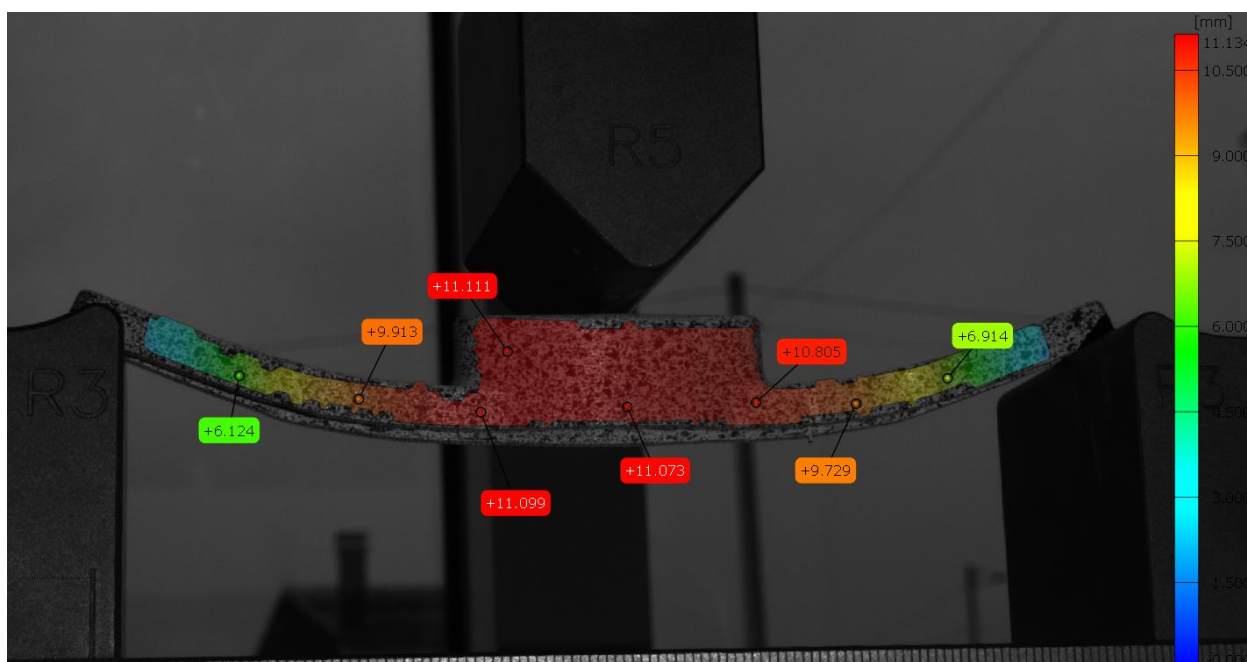
U nastavku se nalaze rezultati redizajniranih uzoraka Z-ULTRAT materijala mjereni do trenutka loma (slike 7.8, 7.9, 7.10, 7.11 i 7.12).



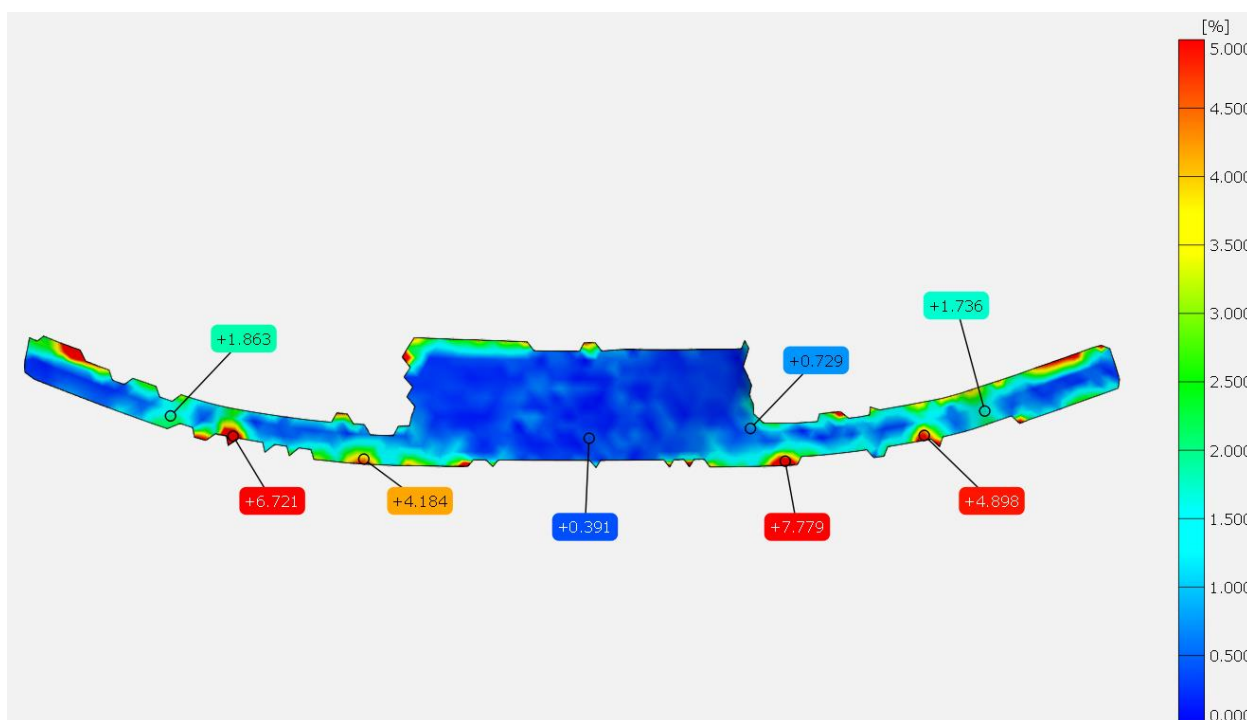
Slika 7.8: Prikaz ukupnog polja pomaka za prvi uzorak redizajnirani od Z-ULTRAT materijala.



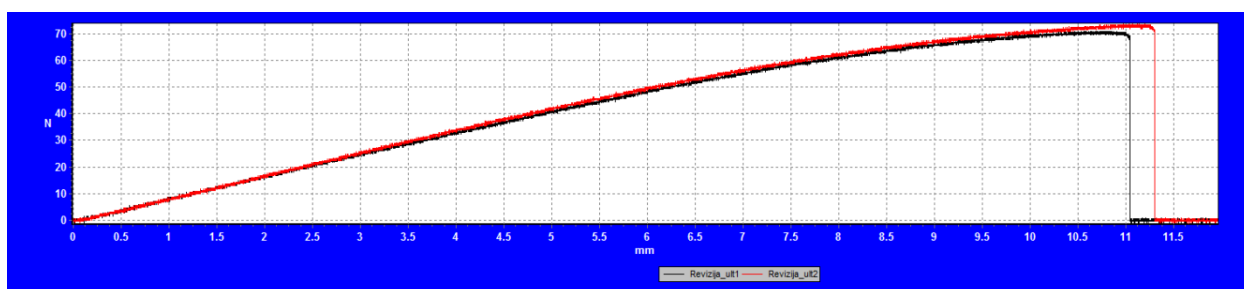
Slika 7.9: Prikaz raspodjele deformacija za prvi redizajnirani uzorak od Z-ULTRAT materijala.



Slika 7.10: Prikaz ukupnog polja pomaka za drugi redizajnirani uzorak od Z-ULTRAT materijala.



Slika 7.11: Prikaz raspodjele deformacija za drugi redizajnirani uzorak od Z-ULTRAT materijala.



Slika 7.12: Dijagram sila-pomak za oba redizajnirana uzorka od Z-ULTRAT materijala.

Na slikama 7.8, 7.10 i na dijagramu sa slike 7.12 je vidljivo da je za redizajnirane uzorke od Z-ULTRAT materijala bilo dovoljno svega 11,10 mm, odnosno u slučaju drugog uzorka 11,60 mm pomaka po Y osi da dođe do loma. Sila pri kojoj je došlo do pucanja prvog ispitnog uzorka iznosi 70,00 N, a kod drugog uzorka ona iznosi 72,50 N.

S obzirom na neuspješnu izradu uzoraka od Z-ASA Pro materijala i lom Z-ULTRAT uzoraka, jedini uspješno redizajnirani uzorci su oni od Z-ABS materijala. To dodatno potvrđuju i dijagrami sila-pomak koji pokazuju bolja svojstva kod redizajna.

Ako uz poboljšana svojstva nadodamo i ostale parametre poput količine potrošenog materijala, vrijeme izrade i cijene izrade primjeraka koji su prikazani u tablicama 4.3. i 7.1, može se zaključiti da su redizajnirane kopče ručke izrađene od Z-ABS materijala najbolji odabir za zamjenu originalne oštećene komponente.

Na sljedećim slikama se može vidjeti lom kopče od Z-ULTRAT-a te primjerak odabrane redizajnirane Z-ABS kopče iz dva ugla (slike 7.13, 7.14 i 7.15).



Slika 7.13: Lom na redizajniranoj kopči od Z-ULTRAT materijala.



Slika 7.14: Prikaz odabrane redizajnirane kopče od Z-ABS materijala.



Slika 7.15: Pogled na unutrašnjost redizajnirane Z-ABS kopče.

8. ZAKLJUČAK

Smisao cijelog završnog rada je napraviti jednu zaokruženu priču o modernim aditivnim tehnologijama i procesima. Jedan prikaz kako je najnovijim beskontaktnim optičkim alatima moguće uhvatiti točan oblik predmeta i njegove prostorne dimenzije, obraditi ga ili čak vršiti beskontaktna mjerenja na njemu. Kako se softverskim rješenjima može napraviti istovjetan proizvod ili ga čak unaprijediti i redizajnirati te kako se niskobudžetnim stolnim 3D pisačima mogu proizvesti visokokvalitetni proizvodi. Velika prednost za izradu ovog rada je bila mogućnost korištenja svih navedenih tehnologija na jednom mjestu. Ta koncentracija najnovijih rješenja i proizvoda iz svijeta aditivnih tehnologija te 3D mjernih sustava se nalazi u „3D Grupa“ klasteru tvrtki.

Na svim aditivno proizvedenim primjercima kopče ručke su vršena intenzivna ispitivanja s velikim opterećenjima ali i zahtjevnim uvjetima, uvjetima kojima te kopče inače ne bi bile podvrgnute pri normalnom korištenju. Svi ispitani materijali su zadovoljili uvjet neprestanog cikličkog pritiskanja gumba vertikalnom duljinom hoda prethodno izmjenjenog maksimalnog progiba. Nadalje, svi materijali prvotne verzije kopče su zadovoljili uvjet statičkog ispitivanja savijanja na tri točke. Iako su kopče imale manju krutost i veće plastične deformacije ipak su podnijele veće vertikalne pomake od onih pomaka što bi bili u stvarnim uvjetima korištenja.

Iz razloga što su sva plastična deformiranja i oštećenja poput raslojavanja bila koncentrirana na jednom području krenulo se u proces redizajniranja postojeće kopče. Rezultati redizajnirane kopče od Z-ABS materijala su nadmašili pretpostavljena očekivanja, tim više što je taj materijal najjeftiniji, najjednostavniji za aditivnu izradu te je najmanje materijala potrebno za izradu jedne zamjenske plastične kopče ručke. Zbog svih navedenih razloga, kopča od Z-ABS materijala je odabrana za zamjenu originalne oštećene plastične kopče ručke.

9. LITERATURA

- [1] Capture3D.com [Online]. Dostupno na: <https://www.capture3d.com/knowledge-center/blog/what-3d-scanning-definitive-guide> (13.10.2020.)
- [2] Drvar N. Optički postupak digitalizacije oblika projiciranjem kodiranog svjetla. Doktorska disertacija. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2008.
- [3] Capture3D.com [Online]. Dostupno na: <https://www.capture3d.com/knowledge-center/blog/white-light-vs-blue-light-scanning> (13.10.2020.)
- [4] Topomatika d.o.o.: Opis mjernih metoda, materijali za praktikante, Zagreb, 2015.
- [5] Gom.com [Online]. Dostupno na: <https://www.gom.com/metrology-systems/atos/atos-q.html> (14.10.2020.)
- [6] Topomatika d.o.o.: GOM brošura za ATOS Core uređaje, Zagreb, 2020.
- [7] Kos J. Izvješće o mjerenju GOM Demo Part-a: materijali za praktikante, Zagreb, Topomatika d.o.o., 2014.
- [8] Izit.hr [Online]. Dostupno na: <http://www.izit.hr/usluge/povratno-inzenjerstvo-reverse-engineering/> (14.10.2020.)
- [9] 3Dprinting.com [Online]. Dostupno na: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/> (18.10.2020.)
- [10] Wikipedia.org [Online]. Dostupno na: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing (18.10.2020.)
- [11] Milković V. Materijali za 3D printanje. Završni rad. Bjelovar: Veleučilište u Bjelovaru; 2017.
- [12] Pavlic T., Jurković I., Subota T. Aditivni postupci u procesu razvoja novih proizvoda s osvrtom na terminološka pitanja. Tehnički glasnik. 2016; 10: 38-44. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:144:609196>
- [13] Support.zortrax.com [Online]. Dostupno na: <https://support.zortrax.com/m-series-specification/> (19.10.2020.)
- [14] Simplify3D.com [Online]. Dostupno na: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/abs/> (19.10.2020.)
- [15] Zortrax.com [Online]. Dostupno na: <https://store.zortrax.com/materials/m200-z-abs> (19.10.2020.)
- [16] Zortrax.com [Online]. Dostupno na: <https://store.zortrax.com/materials/zortrax-m200-z-asa-pro> (19.10.2020.)

[17] Zortrax.com [Online]. Dostupno na: <https://store.zortrax.com/materials/m200-z-ultrat> (19.10.2020.)

[18] Topomatika.hr [Online]. Dostupno na: <https://topomatika.hr/proizvodi/3d-deformacije/aramis/> (20.10.2020.)

[19] Baržić, I. Primjena korelacije digitalne slike za in vitro mjerenje pomaka na svježim kostima. Završni rad. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.

[20] Surjak F. Mjerenje pomaka i deformacija na svježim kostima kod in vitro ispitivanja. Završni rad. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.

[21] Hegewald-peschke.com [Online]. Dostupno na: <https://www.hegewald-peschke.com/products/universal-testing-machines/static-testing-machines.html> (20.10.2020.)

10. OZNAKE I KRATICE

LED - (engl. *Light Emitting Diode*) Svjetleća dioda

STL - (engl. *Stereolithography*) Format datoteke

CAD - (engl. *Computer aided design*) Računalno potpomognut dizajn

STEP - (engl. *Standard for the Exchange of Product*) Format datoteke

IGES - (engl. *Initial Graphics Exchange Specification*) Format datoteke

ACIS - (engl. *Alan, Charles, Ian's System*) Format datoteke

FDM - (engl. *Fused deposition modeling*) Tehnologija taložnog očvršćivanja

FFF - (engl. *Fused filament fabrication*) Tehnologija taložnog očvršćivanja

SLA - (engl. *Stereolithography*) Stereolitografija

SLS - (engl. *Selective laser sintering*) Selektivno lasersko srašćivanje

3DP - (engl. *3D printing*) 3D tiskanje

LOM - (engl. *Laminated object manufacturing*) Proizvodnja laminarnih objekata

LENS - (engl. *Laser engineered net shaping*) Izravno taloženje metala laserom

DMLS - (engl. *Direct metal laser sintering*) Direktno lasersko sinteriranje metala

LPD - (engl. *Layer plastic deposition*) Taloženje slojeva plastike

PLA - (engl. *Polylactic acid*) Polimerni materijal

ASA - (engl. *Acrylic styrene acrylonitrile*) Polimerni materijal

ABS - (engl. *Acrylonitrile butadiene styrene*) Polimerni materijal

PETG - (engl. *Polyethylene terephthalate glycol*) Polimerni materijal

CNC - (engl. *Computer Numerical Control*) Računalno numeričko upravljanje

MPa - megapaskal

kJ/m^2 - kilodžul po kvadratnom metru

GPa - gigapaskal

W - (engl. *Watt*) mjerna jedinica za snagu

μm - mikrometar

kN - kilonjuti

ms - milisekunda

HRK - hrvatska kuna

€ - euro

Hz - (engl. *Herz*) Herc, mjerna jedinica za frekvenciju

11. SAŽETAK

Naslov: Rekonstrukcija, aditivna izrada i funkcionalno testiranje zamjenske plastične komponente

U radu su opisane sve korištene aditivne tehnologije kao i postupci potrebni da bi se oštećena plastična komponenta digitalizirala, rekonstruirala u novu komponentu, izradila 3D pisačem te potom funkcionalno ispitala.

Prva korištena tehnologija je 3D skeniranje pomoću GOM ATOS Q skenera. Opisan je princip rada, postupak skeniranja i uređivanja digitaliziranog oblika originalne oštećene plastične komponente. Zatim se pristupa tehnologiji povratnog inženjerstva, opisuju se postupci rada u programskom alatu Geomagic Design X. Rekonstruirana komponenta se izrađuje aditivnom proizvodnjom na 3D pisaču Zortrax M200 od različitih materijala. Svrha izrade primjeraka od različitih materijala je funkcionalno ispitivanje ponašanja komponente i svojstava materijala pri istim uvjetima. Vršene su tri vrste ispitivanja: statičko i dinamičko ispitivanje te mjerenje progiba izrađene kopče. Svi postupci, pripreme i rezultati su detaljno objašnjeni.

Programska rješenja tvrtke GOM su korištena za sva skeniranja i mjerenja plastičnih komponenti kao i za naknadnu obradu podataka ispitivanja. Korišteni programski alati su; ATOS Professional, ARAMIS Professional, GOM Correlate te GOM Inspect.

Ključne riječi: aditivna tehnologija, 3D skeniranje, povratno inženjerstvo, 3D printanje, 3D mjerenje

12. ABSTRACT

Title: Reconstruction, additive production and functional testing of a replacement plastic component

The thesis describes all used additive technologies as well as the procedures required for digitization of the damaged plastic component, reconstruction to a new component, production with a 3D printer and functional testing.


The first technology used was 3D scanning with GOM ATOS Q scanner. The working principle, the procedure of scanning and editing the digitized form of the original damaged plastic component are then described. Then the technology of reverse engineering and the work procedures in the software tool Geomagic Design X are described. The reconstructed component is made by additive production on a 3D printer Zortrax M200 from different materials. The purpose of making specimens from different materials is to functionally test the behavior of the component and the properties of the material under the same conditions. Three types of tests were performed: static and dynamic testing and deflection measurement of the manufactured component. All procedures, preparations and results are explained in detail.

GOM software solutions were used for all scans and measurements of plastic components as well as for subsequent processing of test data. The software tools used are; ATOS Professional, Aramis Professional, GOM Correlate and GOM Inspect.

Key words: additive technology, 3D scanning, reverse engineering, 3D printing, 3D measuring

IZJAVA O AUTORSTVU ZAVRŠNOG RADA

Pod punom odgovornošću izjavljujem da sam ovaj rad izradio/la samostalno, poštujući načela akademske čestitosti, pravila struke te pravila i norme standardnog hrvatskog jezika. Rad je moje autorsko djelo i svi su preuzeti citati i parafraze u njemu primjereno označeni.

Mjesto i datum	Ime i prezime studenta/ice	Potpis studenta/ice
U Bjelovaru, <u>26.10.2020.</u>	Antonio Horvat	

Prema Odluci Veleučilišta u Bjelovaru, a u skladu sa Zakonom o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju, elektroničke inačice završnih radova studenata Veleučilišta u Bjelovaru bit će pohranjene i javno dostupne u internetskoj bazi Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu. Ukoliko ste suglasni da tekst Vašeg završnog rada u cijelosti bude javno objavljen, molimo Vas da to potvrdite potpisom.

Suglasnost za objavljivanje elektroničke inačice završnog rada u javno dostupnom nacionalnom repozitoriju

Antonio Horvat

ime i prezime studenta/ice

Dajem suglasnost da se radi promicanja otvorenog i slobodnog pristupa znanju i informacijama cjeloviti tekst mojeg završnog rada pohrani u repozitorij Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu i time učini javno dostupnim.

Svojim potpisom potvrđujem istovjetnost tiskane i elektroničke inačice završnog rada.

U Bjelovaru, 26.10.2020.



potpis studenta/ice