

**PRIMENA REVERZIBILNOG INŽENJERSTVA KOD REDIZAJNA NOSAČA TRAČNE TESTERE ZA METAL****APPLICATION OF REVERSE ENGINEERING IN THE REDESIGN OF THE METAL BAND SAW STAND**Dragan Tomić, Mario Šokac, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – MAŠINSKO INŽENJERSTVO**

**Kratka sadržaj** – U okviru ovog rada izvršen je redizajn nosača tračne testere. Izvršeno je 3D skeniranje primenom 3D skenera „EinScan Pro 2X“ baziranog na strukturiranoj svetlosti. Posle 3D skeniranja izvršeno je modeliranje nosača sa ciljem dobijanja njegovog CAD modela. Alat CAD inspekcije je takođe primenjen sa ciljem verifikacije modeliranog CAD modela. Nakon ovoga je izvršen redizajn nosača alata. Takođe je sprovedena strukturalna analiza sa ciljem verifikacije nosivosti redizajniranog i ojačanog nosača alata, kao i njegove praktične primene.

**Ključne reči:** Redizajn, 3D skeniranje, Reverzibilno inženjerstvo, Nosač alata

**Abstract** - As part of this master's work, the band saw stand was redesigned. A 3D scan was performed using a 3D scanner "EinScan Pro 2X" based on structured light. After the 3D scanning, the stand was modeled with the aim of obtaining its CAD model. A CAD inspection tool was also applied to verify the modeled CAD model. After this, the tool stand was redesigned. Structured analysis was also carried out with the aim of verifying the load capacity of the redesigned and reinforced tool stand, as well as its practical application.

**Keywords:** Redesign, 3D scanning, Reverse engineering, Metal band saw stand

**1. UVOD**

Reverzibilno inženjerstvo (eng. *reverse engineering* - RE) može da se definiše, u mašinstvu, kao proces dupliranja nekog proizvoda bez tehničke dokumentacije, dok u širem smislu može predstavljati analizu nekog uređaja ili sistema, način na koji on funkcioniše kao i proučavanje tehnologija koje su primenjene u kreiranju originalnog proizvoda [1].

Reverzibilno inženjerstvo se danas može primeniti kod kreiranja kako komercijalnih delova visoke vrednosti za poslovni profit, tako i za delove kulturnog nasleđa za istorijsku restauraciju. Da bi izvršio ovaj zadatak, inženjeru je potrebno razumevanje funkcionalnosti originalnog dela i veština da replicira njegove karakteristične detalje. U oblastima mašinstva i industrijske proizvodnje, reverzibilno inženjerstvo se odnosi na način kreiranja podataka o

inženjerskom projektu i dokumentaciji od postojećih delova i njihovih sklopova. U pristupu reverzibilnog inženjerstva stvarni delovi se transformišu u inženjerske 3D (trodimenzionalne) modele i koncepte. Reverzibilno inženjerstvo ima veoma uobičajenu oblast širokog spektra kao što su mašinstvo, softversko inženjerstvo, industrija animacije/zabave, mikročipovi, hemijska industrija, elektronika, farmaceutski proizvodi itd [2]. Fokusiranje na domen mašinskog inženjerstva, kroz primenu tehnika reverzibilnog inženjerstva postojeći deo se ponovo rekonstruiše prikupljanjem podataka o površini ili geometrijskim karakteristikama upotrebom kontaktnih ili beskontaktnih uređaja za 3D digitalizaciju ili merenje. Primenom reverzibilnog inženjerstva, kreiranje proizvoda koristi prednosti široke upotrebe CAD/CAM/CAE sistema, i očigledno pruža ogromnu dobit u poboljšanju kvaliteta, svojstava materijala, efikasnosti ponovnog dizajna, proizvodnje i analize. Stoga, reverzibilno inženjerstvo ide sa značajnim poslovnim prednostima u skraćivanju ciklusa razvoja proizvoda [1].

**2. ULOGA I ZNAČAJ REVERZIBILNOG INŽENJERSKOG MODELIRANJA I 3D DIGITALIZACIJE**

Postoji mnogo tipova 3D skenera i tehnologija 3D skeniranja. Neki su idealni za skeniranje kratkog dometa, dok su drugi pogodniji za skeniranje srednjeg ili dugog dometa. Danas se koristi širok spektar 3D skenera i tehnologija 3D skeniranja, što omogućava inženjerima da izaberu najbolju tehnologiju 3D skeniranja, ili čak i kombinaciju više tehnika sa ciljem dobijanja boljih rezultata [3].

3D skeniranje sa strukturiranim svetlom funkcioniše na drugačijem principu od laserskog skeniranja. Sa ovom tehnologijom, uređaj projektuje kodirane binarne paterne (trake) svetlosti na površinu skeniranog objekta. Ove trake su obično skupovi paralelnih linija. Kao i kod drugih tehnologija 3D skeniranja, skeniranje strukturiranom svetlošću koristi jednu ili više kamera koje se nalaze na maloj udaljenosti od izvora svetlosti. Uloga kamere je da uhvati projektovane svetlosne šablone kako se projektuju na površinu skeniranog objekta: sočivo kamere će videti skupove linija kao deformisane (istegnute, proširene, savijene, bliže ili dalje odvojene, itd.) u zavisnosti od oblika površine predmeta. Koristeći niz proračuna, 3D skener može da koristi deformisane linije svetlosti da odredi lokaciju, veličinu i oblik skeniranog 3D objekta.

Izvor svetlosti kod strukturiranih 3D skenera je obično bele boje ili se koristi plava svetlost (LED svetlo), pošto

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio doc. dr Mario Šokac.

se sa ovom vrstom svetlosti možgu postići bolji rezultati i ostvariti visok nivo tačnosti. 3D skeneri bazirani na strukturiranoj svetlosti uglavnom nemaju sisteme za praćenje, već umesto toga koriste tzv. kodirane markere na skeniranom objektu koji „pomažu“ softveru da prepozna gde se različiti snimci preklapaju, kao i da tačno odredi poziciju 3D skenera u prostoru u odnosu na objekat koji se digitalizuje.

Strukturirani ručni 3D skeneri su danas veoma rasprostranjeni i raznovrsni, a neki modeli poput *Shining 3D EinScan Pro HD* mogu da ponude i 3D skeniranje u boji, što otvara brojne mogućnosti. Međutim, strukturirani svetlosni skeneri se ne preporučuju za primenu u svetlim okruženjima, usled toga što kamera može imati problema da prepozna kodirane binarne paterne usled postojanja drugih izvora svetlosti. Strukturirani svetlosni skeneri mogu biti montirani na stativ (stacionarni) ili ručni [4].

### 3. ULOGA I ZNAČAJ METODA ZA DIMENZIONALNU I STRUKTURNU ANALIZU U OBLASTI MAŠINSKOG INŽENJERSTVA

Sa razvojem nauke i tehnologije u oblasti mašinstva, dolazi do pojave proizvoda sa složenom geometrijom. Uporedo su se razvijale i metode za analize i inspekcije istih, počevši od konvencionalnih koje su postajale ograničavajući faktor kod razvoja ovih proizvoda (jer nisu mogle da odgovore na zahteve koji su se pred njih postavljali), do pojave savremenih alata inspekcija, kao odgovor na zahteve savremene proizvodnje. Zahtevi tržišta vezani za estetiku, ergonomiju i aerodinamiku nameću primenu složenih površina. Ove površine se ne mogu opisati standardnim geometrijskim karakteristikama, već uglavnom preko grupe 3D tačaka ili matematički opisanih krivih. Ubrzo nakon pojave CAD modela pojavila se ideja za iskorištavanjem najpre određenih parametara, a zatim i ukupnih modela za potrebe inspekcije i analize. Ova vrsta inspekcije proizvoda, zasnovana na CAD modelu, je ubrzo postala poznata pod nazivom CAD inspekcija [5].

Pod CAD inspekcijom se podrazumeva korišćenje CAD modela proizvoda, tj. njegovih parametara, sa ciljem provere geometrijskih i dimenzionalnih odstupanja. CAD inspekcija je, prateći razvoj CAD modeliranja, najpre bila zasnovana na 2D podacima, da bi se zatim sa pojavom čvrstog (zapreminskog) modela razvila u 3D CAD inspekciju, danas poznata i pod nazivom “*CAD-to-start*” inspekcija. Ovaj vid inspekcije podrazumeva proveru odstupanja geometrije realnog proizvoda (na bazi njegovog digitalizovanog 3D modela) od nominalne geometrije koja je definisana CAD modelom [5].

Metod konačnih elemenata (MKE) (eng. *Finite Element Method - FEM*) predstavlja numerički postupak za približno rešenje graničnih i početnih zadataka, odnosno običnih ili parcijalnih diferencijalnih jednačina sa datim graničnim i početnim uslovima.

Metoda konačnih elemenata je koristan alat za analizu proizvoda za različite vrste mehaničkih opterećenja, a sve u cilju izrade pouzdanijih i dugotrajnijih proizvoda. Ovaj metod predstavlja postupak matematičkog rešenja inženjerskih problema i problema matematičke fizike, a danas ga koriste inženjeri iz različitih oblasti industrije [6].

### 4. REVERZIBILNI INŽENJERING REDIZAJN I ANALIZA NOSAČA TRAČNE TESTERE ZA METAL

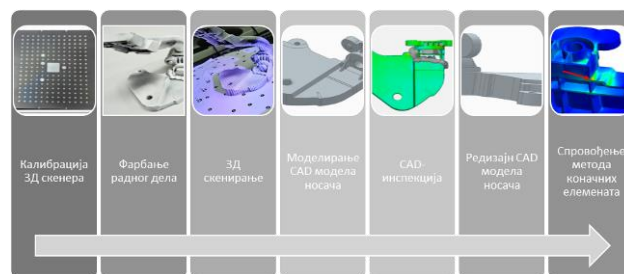
U okviru ovog poglavlja prikazan je proces 3D digitalizacije nosača tračne testere primenom 3D skenera baziranog na strukturiranoj svetlosti *Einscan Pro 2X*, proizvođača *Shining3D*, a zatim i njegovog modeliranja i redizajna sa ciljem njegovog poboljšanja. Nakon redizajna nosača sprovedena je analiza primenom MKE osnovnog i ojačanog nosača sa ciljem njihove međusobne analize.

Na postojećem postolju nosača tračne testere, došlo je do loma nosača usled, najverovatnije, njegovog neadekvatnog dizajna jer je uloga ovog nosača jeste da treba da nosi celu konstrukciju tračne testere prilikom njene upotrebe. Na slici 1 prikazan je nosač nakon postupka zavarivanja sa ciljem 3D digitalizacije, i kasnije i CAD modeliranja.



Slika 1. Nosač tračne testere za metal nakon zavarivanja

Na slici 2 prikazan je algoritam toka rada koji prati ceo ovaj proces.

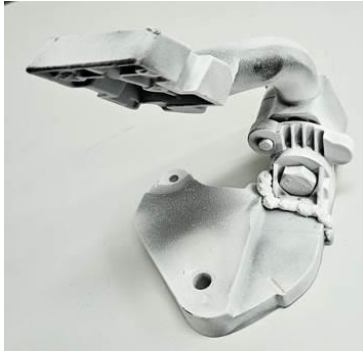


Slika 2. Algoritam toka rada

#### 4.1 Kalibracija, farbanje predmeta i 3D skeniranje

Pre postupka 3D skeniranja neophodno je izvršiti kalibraciju 3D skenera. Postupak kalibracije se izvodi u ručnom režimu, i to na način gde se sa 3D skenerom ručno „prelazi“ preko kalibracione ploče na razdaljini od 400 mm. Sa ciljem dobijanja tačnijih rezultata izvršeno je 3D skeniranje u stacionarnom režimu sa postavljanjem 3D skenera na stalak/tripod i odgovarajući nosač.

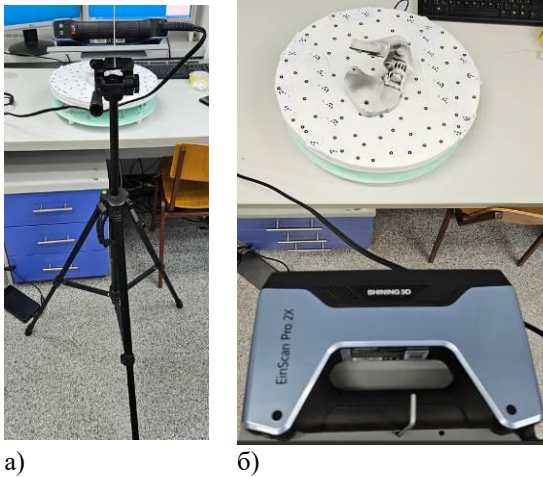
Sa ciljem redukcije uticaja površine objekta na rezultate 3D digitalizacije izvršeno je njegovo privremeno farbanje. Radni predmet je ofarban sa odgovarajućim sprejom u vidu belog praha koji se nanosi u takom sloju na predmet. Na ovaj način se neutrališu negativne karakteristike površine objekta i omogućava se lakše 3D skeniranje (Slika 3).



Slika 3. Ofarban nosač alata pre postupka 3D skeniranja

Prilikom 3D skeniranja spoljašnje geometrije napravljeno je ukupno 28 parcijalnih skenova. Nakon svakog prikupljenog parcijalnog skena, obrtni radni sto je rotiran za  $\sim 10 - 15^\circ$  gde je nakon toga izvršeno 3D skeniranje u toj poziciji.

Nakon ovoga se ceo postupak ponovo ponavlja dok se ne prikupe informacije o kompletnoj geometriji nosača alata. Na slici 4 je prikazan postupak 3D skeniranja nosača.

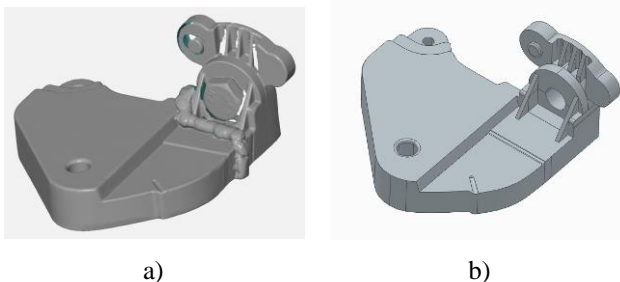


Slika 4. 3D skeniranje sa 3D skenerom a) postavljenim na stalak i b) pogled od gore

#### 4.2 Modeliranje osnovnog CAD modela i sprovođenje CAD inspekcije

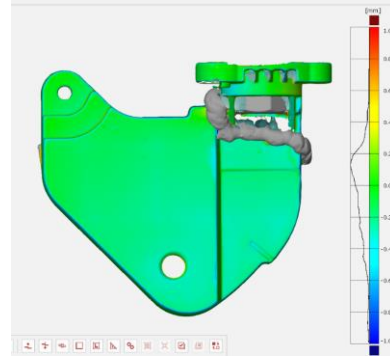
Nakon završenog 3D skeniranja pristupljeno je modeliranju osnovnog CAD modela na bazi digitalizovane geometrije nosača.

Na slici 5a prikazan je površinski 3D model nosača nakon 3D skeniranja, a na slici 5b je prikazan izmodeliran osnovni CAD model nosača.



Slika 5. Skenirani 3D model nosača, i b) njegov CAD model

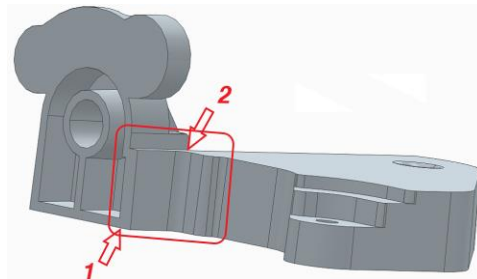
Nakon što je izvršeno modeliranje CAD modela originalnog nosača, sprovedena je CAD inspekcija sa cinjem utvrđivanja odsupanja geometrije CAD modela u odnosu na skeniranu geometriju nosača. Ovaj korak inspekcije je bio bitan sa ciljem utvrđivanja odstupanja modelirane geometrije u odnosu na skeniranu geometriju nosača, kako bi se moglo nastaviti sa daljim tokom rada (Slika 6).



Slika 6. CAD Inspekcija nosača

#### 4.3 Redizajn CAD modela nosača alata

Uzimajući u obzir način i mesto na kojem je došlo do loma nosača, pristupljeno je njegovom redizajnu. Tokom ove faze vođeno je računa da se oblik nosača ne promeni usled njegove uloge. U skladu sa tim izvršeno je ojačanje određenih pozicija na CAD modelu nosača. Ojačane su pozicije broj 1 i 2 prikazane na slici 7. Za poziciju 1 je pojačana debljina zida nosača za 1,5 mm, a za poziciju 2. je ubačen radijus  $R=2$  mm umesto oštre ivice koja je tu bila prisutna. Što se tiče donje strane nosača, rebra su takođe ojačana za dvostruko veću vrednost (koja iznosi 2 mm).



Slika 7. Mesto ojačavanja nosača

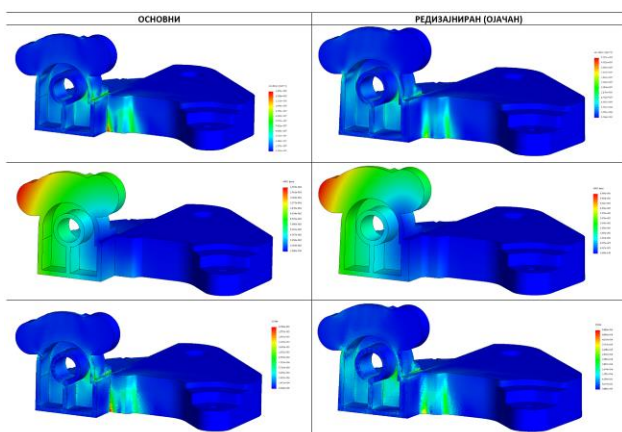
#### 4.4 Strukturna analiza primenom metode konačnih elemenata

U okviru ovog dela izvršena je analiza metodom konačnih elemenata (MKE) osnovnog i redizajniranog (ojačanog) nosača. Za potrebe analize osnovnog i redizajniranog (ojačanog) nosača u ovoj analizi je korišćena analiza statičkog opterećenja. Radi sprovođenja adekvatne analize primenom MKE, potrebno je izabrati materijal od koga će nosač biti izrađen. Materijal je moguće izabrati iz unapred definisane baze podataka materijala, a u kojoj se nalaze materijali kao što su čelik, aluminijum, bakar, guma i razni plastični materijali.

Nakon definisanja svih ulazni parametara, pokreće se analiza gde se nakon završene analize dobija model sa obeleženim delovima na kojima je moguće doći do deformacije materijala. Analizirana su tri parametra, a to su:



- Totalna deformacija (Von Misses-ovi naponi);
- Izduženje (po X, Y, Z ili XYZ osi);
- Ekvivalentni napon.

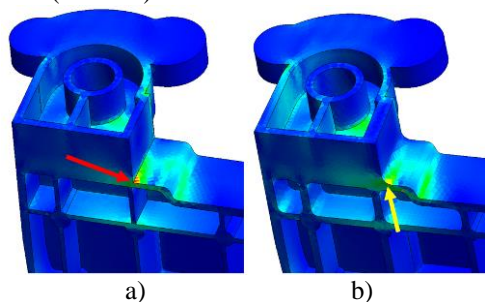


Slika 8. Prikaz Von Mises-ovih napona, izduženja i ekvivalentnih napona za osnovni i redizajniran (ojačan) nosač

Na Slici 8 može se videti raspored Von Misses-ovih napona na nosaču u vidu pojave deformacija. Gravitaciona sila kojom se deluje na nosač od strane testere je 150 Nm gde se na skali sa desne strane može uočiti, pored brojčanih vrednosti, i boja koja se menja u zavisnosti od intenziteta sile. Tako plava boja predstavlja mali intenzitet delovanja sile odnosno nema pojave napona, dok crvena boja predstavlja velik intenzitet delovanja sile za projektovani model i materijal koji se koristi, te postoji opasnost od deformacije i loma strukture i u skladu sa tim je bilo potrebno izvršiti redizajn nosača, što je i urađeno u okviru ovog master rada.

Na bazi analize MKE ustanovljeno je da u zoni prelaza sa tela na glavu nosača dolazi do pojave velikih napona u vidu crvene boje usled čega je i došlo do loma. Dok je kod redizajniranog (ojačanog) nosača došlo do smanjenja napona u toj zoni usled pojačanja debljine zida i dodavanja radijusa na tom mestu. Pojava napona je takođe evidentna i na rebrima za ojačanje sa donje strane nosača, a gde je njihova debljina povećana kod redizajnirane verzije nosača.

Kod napona, takođe je ustanovljeno da dolazi do značajnijeg ekvivalentnog napona u osnovnoj verziji nosača alata (Slika 9a). Dok je kod redizajniranog (ojačanog) nosača došlo do redukcije ekvivalentnog napona u toj zoni usled pojačanja debljine zida i dodavanja radijusa na tom mestu (slika 9b).



Slika 9. Komparativni prikaz ekvivalentnih napona kod a) osnovnog nosača (crvena strelica) i kod b) redizajniranog (ojačanog) nosača (žuta strelica)

## 5. ZAKLJUČAK

U okviru ovog master rada je detaljno predstavljena primena reverzibilnog inženjerskog dizajna, inženjerskih analiza, kao i teorijski osvrt na tehnologiju 3D digitalizacije primenom metode bazirane na strukturnoj svetlosti.

U okviru ovog master rada predloženo je tehničko rešenje redizajna nosača tračne testere koje će se aktivno koristiti i dalje razvijati nakon njegove izrade. Takođe je predstavljena detaljna primena odgovarajućih softverskih alata uz pomoć kojih su modelirani svi elementi nosača tračne testere, urađena CAD inspekcija i na kraju urađena analiza MKE. Na osnovu izloženog može se doći do zaključka da je primena softverskih CAD alata koji su prezentovani u radu, moguće postići značajno skraćivanje vremena potrebnog za dizajn ili redizajn nekog proizvoda. Primenom softvera u svrhu numeričke analize statičkih i drugih ograničenja mogu se pravovremeno uočiti kritične delovi elemenata sklopa, kao i mogućnost njihovog poboljšanja.

## 6. LITERATURA

- [1] Prof. dr Miroslav Plančak, "Brza izrada prototipova, modela i alata", *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad* 2009.
- [2] Šokac M., Budak I., Katić M., Jakovljević Ž., Santoši Ž., Vukelić Đ., "Improved surface extraction of multi-material components for single-source industrial X-ray computed tomography", *Measurement*, Vol. 153, 2020.
- [3] Šokac M., Santoši Ž., Budak I., Car Z., Vukelić Đ., "Combination of contact and optical 3D digitizing methods for their application in reverse engineering", *8. International Conference on Innovative Technologies IN-TECH*, Ljubljana: Faculty of Mechanical Engineering, 11-13 September, 2017, pp. 65-68, ISBN 0184-9069.
- [4] <https://www.shining3d.com/blog/handheld-3d-scanner-light-sources-laser-lines-vs-structured-light-vs-infrared/> (pristupljeno 20.09.2023).
- [5] Budak I.; Hodolić J., „Reverzibilno inženjerstvo i CAD-inspekcija-skripta“, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*, 2007.
- [6] [http://www.dpm.ftn.uns.ac.rs/attachments/article/64/Modelovanje\\_Predavanje\\_5\\_Numerika\\_Uvod+MKE\\_1.pdf](http://www.dpm.ftn.uns.ac.rs/attachments/article/64/Modelovanje_Predavanje_5_Numerika_Uvod+MKE_1.pdf) (pristupljeno 20.09.2023).

### Kratka biografija:



**Dragan Tomić** rođen je u Bijeljini 1998. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Mašinskog inženjerstva odbranio je 2023.god.

Kontakt: [dragan.tomic998@gmail.com](mailto:dragan.tomic998@gmail.com)



**Mario Šokac** rođen 1989. god. Doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2019. god., a od 2020. god. je zvanju docenta. Uže oblasti interesovanja su reverzibilni inženjerski dizajn, metode 3D digitalizacije i dizajn biomedicinskih modela.