

Dizajn, istraživanje i razvoj kolekcije ženskih cipela visokih potpetica primjenom 3D ispisa od polilaktida

2. dio: Razvoj i izrada prototipa ženskih cipela

Design, research and development of a collection of women's high-heeled shoes using polylactide 3D printing

Part 2: Development and production of a prototype of women's shoes

Znanstveni rad / Scientific paper

Sara Stojko¹, Suzana Kutnjak-Mravlinčić^{2*}, Tea Krišković¹

¹Tvornica obuće Ivančica d.d., Ivanec, Hrvatska

²Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Studijska jedinica Varaždin, Hallerova aleja 6a, 42 000, Varaždin, Hrvatska

*Korespondencija: suzana.kutnjak-mravlincic@tff.unizg.hr

Sažetak

U prvom djelu rada prikazano je dizajnersko istraživanje autorske kolekcije, a u drugom djelu opisan je i vizualno dokumentiran proces razvoja i izrade prototipova ženskih cipela visokih potpetica. Uvodni dio rada sažeto opisuje postupak taložnog očvršćivanja (engl. *Fused Deposition Modeling* – FDM), karakteristike stolnih 3D pisača te primjenu postupaka aditivne proizvodnje (engl. *Additive Manufacturing* - AM) u dizajnu obuće. Eksperimentalni dio rada, na primjeru dva realizirana prototipa ženskih salonki, opisuje proces konstrukcije CAD modela potpetica, njihovu izradu na stolnom 3D pisaču od polilaktida (PLA) i konstrukciju gornjišta salonki tradicionalnim tehnikama i postupcima u proizvodnji obuće. Primjenom 3D ispisa želi se na brz i jednostavan način interpretirati autorska ideja u izradi složenijih oblika potpetica. Rad također teži prikazati kako suvremene tehnologije utječu na sve grane ljudske djelatnosti, uključujući i obućarsku industriju. Naglašava se potreba za brzim i inovativnim rješenjima na tržištu zbog stalnog porasta broja raznih modela obuće i skraćenog vijeka trajanja proizvoda. U tom kontekstu, aditivna proizvodnja (3D ispisi) omogućuje izradu tvorevina u kratkom vremenskom roku izravno iz računalnog modela (engl. *Computer Aided Design* - CAD) bez dodatnih alata, što je i prikazano u rezultatima rada na primjerima realiziranih prototipa ženskih cipela visokih potpetica.

Ključne riječi: taložno očvršćivanje; konstrukcija CAD modela potpetica; 3D ispisi; polilaktid; konstrukcija gornjišta; salonka; prototipovi visokih potpetica

Abstract

The first part of the paper Design, research and development of a collection of women's high-heeled shoes using polylactide 3D printing presents the design research of the author's collection, and this second part describes and visually documents the process of developing and producing prototypes of women's high-heeled shoes. The introductory part of the paper briefly describes the process of fused deposition modelling (FDM), the characteristics of desktop 3D printers and the application of additive manufacturing (AM) in shoe design. The experimental part of the paper describes the process of designing CAD models of heels and their production on a desktop 3D printer made of polylactide (PLA) using the example of two realised prototypes of women's shoes as well as the construction of shoe uppers using traditional techniques and processes in shoe production. By using 3D printing, the author's idea should be quickly and easily translated into the production of more complex shapes of heels. The paper also aims to show how modern technologies are impacting all areas of human endeavour, including the footwear industry. The need for fast and innovative solutions on the market is emphasised by the constantly growing number of fashion models and the shortened product life cycle. In this context, additive manufacturing (3D printing) enables the production of products in a short time directly from a computer model (e.g. Computer Aided Design - CAD) without additional tools, as the results of the work on examples of prototypes of women's high heels show.

Keywords: fused deposition modeling; CAD model construction of heels; 3D printing; polylactide, high heels prototypes

1. Uvod

Industrija obuće kontinuirano se razvija, a u njezinu su sektoru održivost i integracija digitalnih tehnologija prepoznate kao najvažniji trendovi [1]. Kao odgovor na te zahtjeve na potrebu tržišta za brzim, inovativnim rješenjima zbog stalnog skraćivanja životnog vijeka proizvoda, ističe se aditivna proizvodnja (engl. *Additive Manufacturing* – AM). AM, poznata i kao 3D ispis, napredna je tehnologija koja značajno transformira postupke dizajna i izrade obuće. Ovi se postupci razvijaju i primjenjuju još od druge polovice 80-ih godina 20. stoljeća. Iako su u početku bili fokusirani na brzu izradu prototipova (engl. *Rapid prototyping* – RP) te alata i kalupa, zahvaljujući napretku u razvoju materijala, danas se AM koristi i u proizvodnji gotovih proizvoda u malim serijama ili kao personalizirani, pojedinačni proizvodi. Temeljni princip aditivne proizvodnje je izgradnja objekta dodavanjem materijala sloj po sloj. Ova metoda donosi iznimnu prednost u izradi tvorevina u kratkom roku i to izravno iz računalnog modela (engl. *Computer Aided Design* - CAD), bez potrebe za upotrebom dodatnih alata. Aditivni postupci pružaju veliku fleksibilnost u oblikovanju, omogućujući realizaciju kompleksnih geometrijskih oblika koji bi bili izuzetno teški ili nemogući za postizanje klasičnim proizvodnim tehnikama [2]. U modnom sektoru pa tako i u obućarstvu, AM znatno skraćuje vrijeme i smanjuje troškove razvoja novih modela, naročito kod izrade prototipova i manjih serija, uključujući personalizirane komade [3].

Jedan od najraširenijih aditivnih postupaka je taložno očvršćivanje (engl. *Fused Deposition Modeling* – FDM), koje se često naziva i izrada postupkom taljenja niti (engl. *Fused Filament Fabrication* – FFF). Popularnost FDM-a leži u njegovoj ekonomskoj pristupačnosti, jednostavnosti korištenja i širokom izboru komercijalnih materijala. U ovom postupku, polimerni materijal u obliku žice (filamenta) prolazi kroz mlaznicu, gdje se zagrijava do temperature taljenja. Omekšani materijal se zatim polaže sloj po sloj na radnu podlogu 3D pisača i tamo očvršćuje. Najčešće primjenjivani materijali za FDM su polimeri, a među njima se ističu polilaktid (PLA), biorazgradivi plastomer dobiven iz obnovljivih izvora, te akrilonitril/butadien/stiren (ABS), amorfni kopolimer poznat po svojoj dimenzijskoj stabilnosti [2, 3]. Na tržištu danas postoji velik broj 3D pisača različitih karakteristika i namjena, a jedan od njih je i model BCN3D Sigmmax R19 korišten u ovom radu za 3D ispis visokih potpetica od polilaktida (PLA). Ovaj pisač posjeduje nezavisni sustav dvostrukog ekstrudiranja (IDEX), što mu omogućuje dvostruki i zrcalni ispis, pogodan za izradu većih serija. Prije samog 3D ispisa, CAD modeli pretvaraju se u STL datoteke koje se u pripadajućem softveru (npr. BCN3D Cura ili MakerWare) obrađuju te se generira G-kod za pisač [4, 5]. Ključni parametri ispisa koji se moraju definirati uključuju debljinu sloja (0,1 – 0,3 mm), gustoću ispune (10–100 %), brzinu ispisa te temperature mlaznice (npr. 200 °C za PLA) i podloge. Također je važna i orijentacija ispisa, koja se određuje prema željenim mehaničkim svojstvima, geometriji modela i potrebi za potpornom strukturom [6, 7].

Primjena FDM postupka u ovom radu istražena je u kontekstu izrade autorskih modela prototipova ženskih cipela visokih potpeticama od PLA, omogućujući realizaciju složenih i nekonvencionalnih dizajnerskih ideja.

2. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu rada prikazane su faze konstrukcije i izrade autorske mini kolekcije ženskih avangardnih cipela primjenom digitalnih alata i tehnologija. Prikazan je proces konstruiranja gornjišta te proces konstruiranja CAD modela potpetica u računalnom programu za trodimenzionalno modeliranje te priprema i 3D ispis potpetica od PLA. Realizirana su dva prototipa modela ženskih salonki u suradnji s timom stručnjaka Tvornice obuće Ivančica d.d. Ivanec.

2.1. Konstrukcija gornjišta ženskih salonka cipela

Konstrukcija obuće započinje izborom kalupa prema kojem se biraju odgovarajući dijelovi donjišta obuće (potpetica, potplat, tabanica) i ugradbeni dijelovi (montažni lub, kapica) te se izrađuje konstrukcija

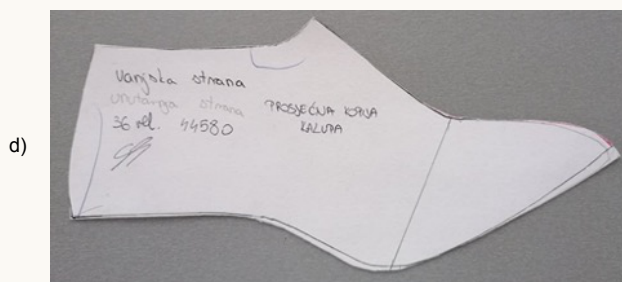
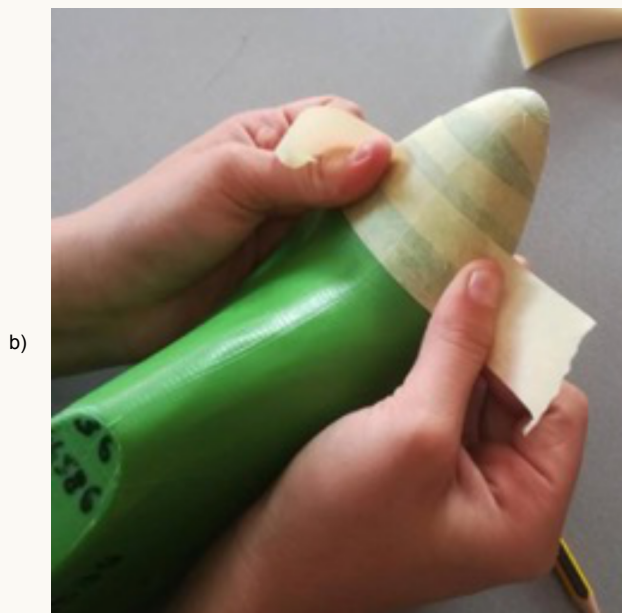
krojnih dijelova gornjišta. Kalup je stilizirani prikaz oblika stopala koji se koristi kao podloga za izradu obuće. Izrađuje se prema standardnim mjerama propisanim određenim sustavom mjera ili po individualnim mjerama stopala. Konstruiran je da stane unutar cipele, na isti način na koji bi noga sjela, s prostorom za pokret te za smještaj potpetice i potplata. Kalup se mijenja s promjenom vrste obuće, ali i oblikom npr. prednjeg dijela, veličinom ili širinom stopala. Oblikom kalupa uvjetovan je izgled, forma, vrsta ili tip obuće te visina potpetice.

Za razumijevanje konstrukcije obuće nužna su znanja o anatomiji ljudskog stopala. Stopala su jedna od najosjetljivijih i kompleksnijih dijelova tijela. Zauzimaju veoma malu površinu, ali nose težinu cijelog tijela i pomažu balansirati tijelo. Može se reći da su pod stalnim naporom i stresom. Dobro dizajnirane cipele moraju biti ne samo estetski privlačne, već i udobne te poticati učinkovitu mobilnost. Iz navedenih razloga uvijek je potrebno voditi računa o slijedećim osnovnim načelima u konstrukciji obuće [8, 9]:

- Prostor u prednjem dijelu od vrha oglavka (završetka obuće) do vrha prstiju treba biti oko 10 - 15 mm što omogućava prostor stopalu i pokret prstiju unutar cipele prilikom hodanja.
- Oblik petnog dijela važan je zbog pravilne prilagodbe gležnju stopala prilikom kretanja (ako je prelabav ili prenategnuto može prouzrokovati neugodnost prilikom nošenja).
- Prilikom nošenja visokih potpetica težište je preusmjereno na prste stoga je značajna uložna tabanica s anatomske jastučićem u prednjem dijelu.
- Osobito je važno da je potpetica optimalne visine te da se povećava proporcionalno s potplatom u prednjem dijelu, što uvjetuje veću udobnost i lakoću kretanja.
- Povišeni prednji dio kod obuće, je osnovni dodatak između dna prstiju cipele i tla (prednji dio podiže se prema gore umjesto spuštanja ravno na tlo), a primjenjuje se za prilagodbu gibanja hoda.

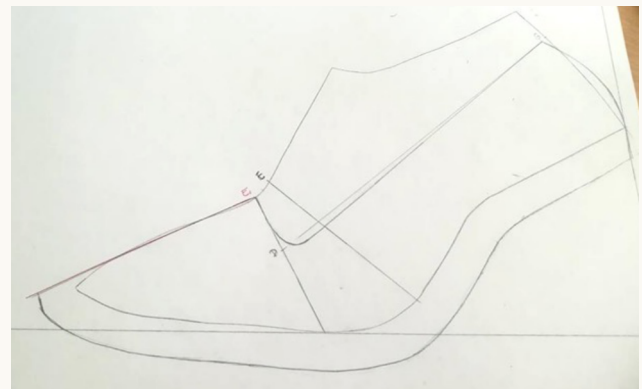
Kalup odabran za izradu prototipa ženskih salonka cipela „Garbody 4.0“ je neokovani kalifornija tip kalupa napravljen iz plastičnih polimera s metalnom ugradnjom za otvaranje i klinom za izvlačenje kalupa. Izrađen je prema individualnom skenu autorovog stopala na uređaju za 3D skeniranje stopala. S obzirom da se radi o izradi kalupa po mjeri oblik i visina potpetice određena je prema osobnim zahtjevima. Visina potpetice od 8 cm predstavlja optimalnu visinu koja ne stvara deformacije te ostavlja stopalo u zdravom položaju. Drugi parametar u izgledu obuće je prednji oblik kalupa za koji je odabran šiljasti izgled (slika 1a). Kod odabira šiljastog oblika kapice poželjno je ostaviti dovoljno prostora za zdrav položaj prstiju. Veličina kalupa iznosi: f.u 36, e.u 3,5 i cm 24 (*f.u* - pariški ubod (engl. *parispoint*), e.u - engleski ubod (engl. *englishpoint*) i cm - centimetarski sustav).

Kopija kalupa rađena je na principu obljepjivanja papirnate trake po površini kalupa (slika 1b). Dobivena je ručnim postupcima svođenja svih neravnih ploha kalupa na jednu ravnu plohu čime se omogućuje precizan i kontroliran početak procesa konstruiranja modela. Ovakav način karakterističan je za obrtničku proizvodnju obuće i za industrijske proizvodnje koje još uvijek primjenjuju ručni način izrade kopije kalupa ili personalizirane kalupe. Razvojem specijaliziranih računalnih sustava 2D mjere kalupa moguće je lako i precizno dobiti i putem 3D skeniranih kalupa. Kopiranjem kalupa dobiva se mjera profila kalupa, na kojoj se crtaju gornji dijelovi obuće. Greške pri izradi kopije kalupa odražavaju se na estetski izgled modela, kao npr. gornjište obuće loše prijanja na kalup prilikom navlačenja. Na slici 1c prikazane su unutarnja i vanjska kopija kalupa, s oznakama broja kalupa, veličine, naziv modela i strane kalupa. Razlike između unutarnje i vanjske strane stopala rezultirat će razlikama na kopiji kalupa koje se izjednačavaju izradom prosječne kopije kalupa (slika 1d) pomoću koje se dobiva osnova modela s razlikama u donjem dijelu (ukoliko ih ima). Razlike koje se izjednačavaju nastaju zbog asimetričnosti stopala, razlikama u unutarnjoj i vanjskoj strani stopala ili zbog pogrešno određene središnje linije po kojoj je izrezana sredina [10].



Slika 1. Postupak izrade kopije kalupa: a) kalup b) proces obljepjivanja kalupa samoljepljivom trakom, c) unutarnja i vanjska strana kopije kalupa i d) prosječna kopija kalupa

Iako je modeliranje obuće individualan proces te se svaki krojni dio mijenja s obzirom na kalup i model obuće, postoje standardna polazišta od kojih kreće proces konstruiranja. Skup mjera koje ovise o duljini kalupa nazivaju se osnova modela (slika 2). Osnova modela crta se na papiru s ucrtanom pravom kutom na čiju se x-os postavlja peta prosječne kopije kalupa u visini potpetice odgovarajuće za kalup, u ovom slučaju 8 cm, dok se prednji dio spušta na y-os. U tom se položaju ucrtava prosječna kopija kalupa, označava pregib prstiju i pete koji se dobiva konstrukcijom zlatnog reza. Prema pregibu prstiju ucrtava se prosječna linija oglavka, a na petnom dijelu određuje, ovisno o dužini kalupa, visina luba te 3 mm dodatak za ugradbeni lub. Prije konstruiranja krojnih dijelova potrebno je označiti upust (dodatak) u donjem dijelu, čije vrijednosti ovise o debljini materijala te tehnološkom postupku izrade. Upust za navlačenje je dodatak na kopiji kalupa, koji omogućuje navlačenje gornjeg dijela cipele na kalup, odnosno koji omogućuje spajanje gornjih dijelova cipele s donjim dijelovima. Za prototip salonke dodani su sukladno tehnološkom postupku izrade te praksi u tvornici *Ivančica d.d.* Ivanec gdje su prototipovi izrađivani [10].



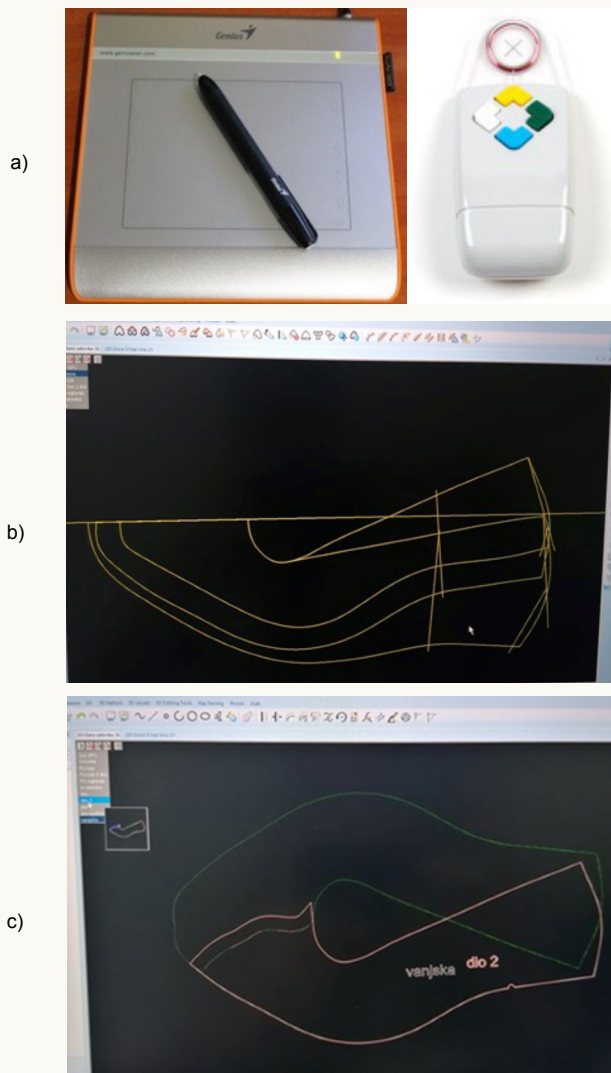
Slika 2. Osnova modela [10]

2.1.1. Računalno modeliranje gornjišta ženskih salonka cipela

Računalno potpomognuta proizvodnja obuće prisutna je u svim segmentima od razvoja do izrade, a samo jedan od primjera je modeliranje obuće u računalnom programu *Procam Dimension*. Najveća prednost ovakvog načina rada je veća preciznost, kraće vrijeme izrade te mogućnosti brzih izmjena.

Ručno izrađena osnova modela učitava se u računalni program pomoću uređaja za digitalizaciju ili grafičkog tableta koji se sastoji od tablet ploče te uređaja za crtanje (miš ili olovka) kako bi se mogla dodatno obrađivati (slika 3a).

Osnova modela se polaže na tablet ploču te se pomoću miša određuju pozicijske točke koje smještaju projicirane linije osnove u zaslonski prostor. Ocrtavaju se linije osnove modela te posebno linija pregiba prstiju, stopala i ucrtani krojni dijelovi salonke. Označene točke stvaraju linije koje se prenose u računalni program na daljnje uređivanje (slika 3b). Proces konstruiranja obuće u računalnom programu započinje ucrtavanjem dodatnih linija pomoću kojih se definiraju krojni dijelovi. Proces ucrtavanja linija je jednostavan i brz, a značajno je da svaka linija zatvara plohu s ostalim linijama kako bi se mogao stvoriti novi krojni dio. Naredbom „novi krojni dio“ označavaju se sve linije koje tvore željeni krojni dio te se njome on formira u zasebnom prozoru za dodatno uređenje (slika 3c). Ovisno o tehnološkim uputama i obradi dodaju se odgovarajuće tehnološke oznake za pozicije dijelova ili šavova te ucrtavaju upusti.



Slika 3. Računalno modeliranje u CAD programu *Procam Dimension*: a) Digitalizator: tablet ploča i miš za povlačenje linija, b) osnova modela i c) krojni dijelovi prototipa salonke „*Garbody 4.0 - srce*“

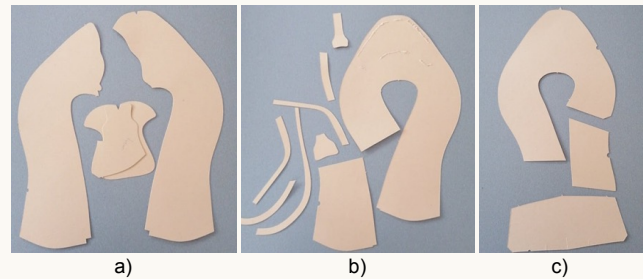
Nakon obrađenih svih krojnih dijelova gornjišta, uctavaju se linije podstave, međuplatna te spužve za koje se istim načinom izrađuju krojni dijelovi. Krojni dijelovi gornjišta salonke „*Garbody 4.0 - srce*“ sastoje se od dvije sarice spojene u prednjem dijelu lice na naličje te licem na lice u petnom dijelu. Na prednjem dijelu dodan je jezik izrađen iz dva dijela (gornji i donji dio) te je umetnuta spužvica. Gornjište salonke „*Garbody 4.0 - mozak*“ izrađeno je klasičnim postupkom salonke iz dva dijela rezana u unutarnjem dijelu te peti spajana lice na lice. Gornji dio ukrašen je dodatnim ukrasnim elementima čije je pozicije bilo potrebno označiti radi lakšeg i točnijeg snalaženja u proizvodnji.

Podstava i međupodstava konstruirana je jednako na oba modela. Podstava je izrađena iz dva dijela (luba te ostatka spojenih sarica), dok se međupodstava sastoji od dva dijela te pojačanja za podvijanje.

2.1.2. Šablone krojnih dijelova

Kada su svi krojni dijelovi modelirani slijedi na automatu za automatsko krojenje izrezivanje šablona krojnih dijelova lica, podstave, međupodstave te spužvica. Pripremljene šablone prema kojima će se krojiti dijelovi za izradu prototipa prikazane su na slici 4, a koriste se i kao provjera modelaru te pomoć pri izradi modela. Slika 4a prikazuje pripremljene šablone za iskrojavanje krojnih dijelova lica prototipa 1 „*Garbody 4.0 - srce*“, slika 4b krojne dijelove lica prototipa 2 „*Garbody 4.0 - mozak*“ te slika 4c krojne dijelove podstave.

Krojni dijelovi podstave identični su za oba prototipa.

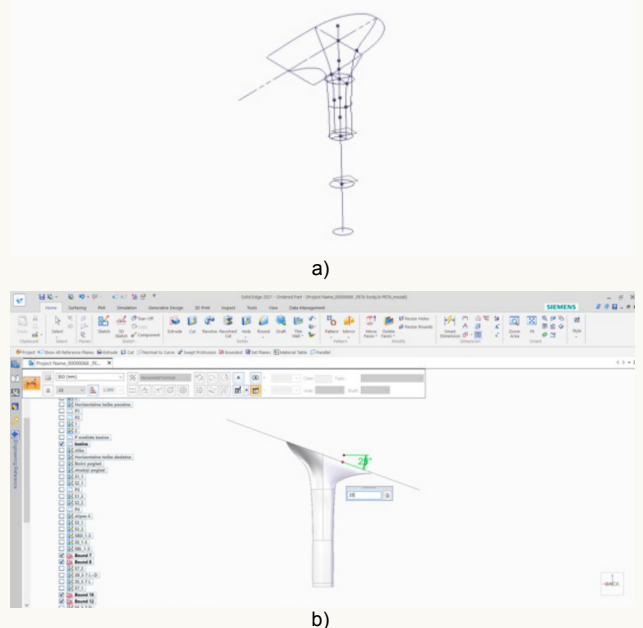


Slika 4. Šablone za izradu krojnih dijelova: a) lica prototipa 1, b) lica prototipa 2 i c) podstave

2.2. Računalna konstrukcija prototipova potpetica

Konstrukcija potpetice za prototip modela „*Garbody 4.0 - srce*“ i „*Garbody 4.0 - mozak*“ rađena je u računalnom CAD programu za 3D modeliranje *Solid Edge*. Za konstrukciju potpetica iz alatne trake programa korišteni su alati za skiciranje, izradu punih tijela i rad s površinama.

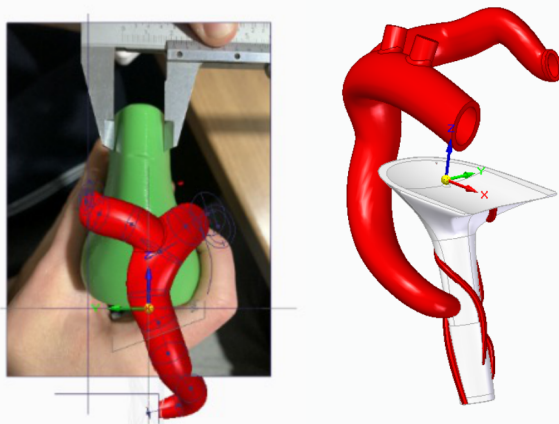
Iako bi se potpetica idealno modelirala prema uvezenom 3D skenu kalupa, u ovom slučaju, budući da se radi o prototipnom modelu, potpetica je konstruirana prema ručnim izmjerama (slika 5). Proces izrade modela u računalnom programu *Solid Edge* započinje 2D skicom koja se sastoji od geometrijskih oblika definiranih točkama, linijama, lukovima i elipsama. Gornji dio potpetice, odnosno prihvat koji se pričvršćuje na gornjište kalupa, konstruiran je prema kopiji tabaničnog dijela kalupa koja je uvezena u program. Tijekom konstrukcije potrebno je voditi računa o debljini materijala u području upusta i dijelu potplata koji ulazi u petni dio. Za postizanje željenog kružnog izgleda potpetice koja se sužava prema dnu, izrađeno je više paralelnih ravnina iznad gornje ravnine, na kojima su skicirane kružnice koje su zatim spojene (slika 5a). Alatom za površine (e. *Surfaces*) izrađen je čvrsti oblik potpetice koji je poslužio kao osnova za oba prototipa (slika 5b). Radi stabilnosti potpetice, nakon 3D ispisa planirano je uprešavanje metalnog pojačanja s navojima za prihvat centralnog vijka (za pričvršćivanje na gornjište) i natpetnika. Potpetica je stoga konstruirana sa središnjim prostorom od 2,5 mm za smještaj ovog ojačanja.



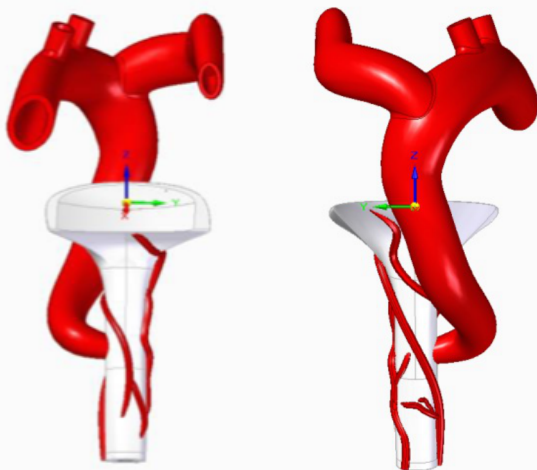
Slika 5. Konstrukcija potpetice u računalnom programu *Solid Edge*: a) modeliranje i b) CAD model

Prototip potpetice „*Garbody 4.0 - srce*“ (prototip 1) dodatno je dizajniran krivuljama debljine 3 do 5 mm koje se protežu duž cijele potpetice i

konstruirane su na zasebnim ravnima kako bi se mogle ispisati u različitoj boji (slika 6). Na vanjskom dijelu potpetice također je konstruirano udubljenje za smještaj dodatka koji se proteže na petni dio gornjišta. Dodatak je zaseban dio koji se pričvršćuje nakon montaže potpetice te je konstruiran pomoću umetnutih slika kalupa iz različitih pozicija (slika 6a). Završni izgled CAD modela potpetice i dodatka prototipa prikazan je na slici 6b.



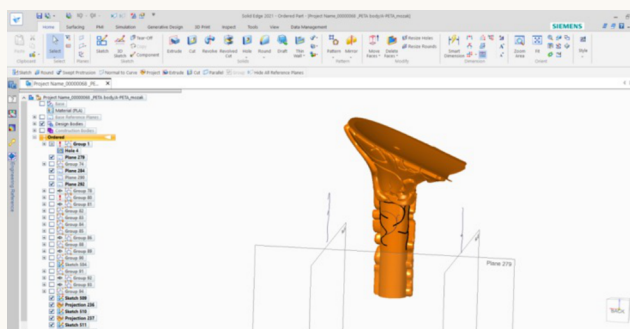
a)



b)

Slika 6. Prikaz CAD modela potpetice za prototip 1: a) dodatak za potpeticu i b) završni CAD model potpetice i dodatka pripremljen za ispis u dvije boje

Prototip modela „Garbody 4.0 - mozak“ konstruiran je principom dodavanja objekta na bazni dio potpetice s ciljem stvaranja reljefne površine (slika 7a). Po površini potpetice isctane su nepravilne, organski oblikovane linije nalik moždanim vijugama, koje su naredbom ekstrud (engl. *extrude*) oblikovane u reljefne strukture debljine od 1 do 3 mm. Završni izgled CAD modela potpetice za prototip „Garbody 4.0 - mozak“ prikazan je na slici 7b.



a)



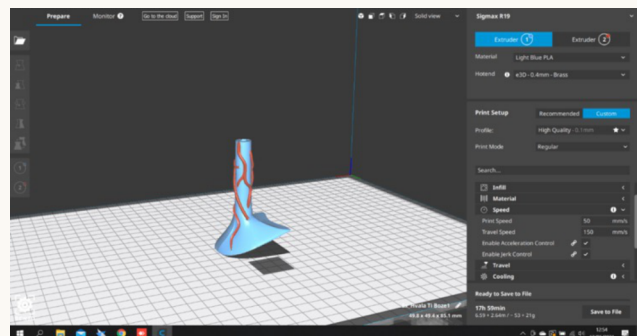
b)

Slika 7. Prikaz CAD modela potpetice za prototip 2: a) konstruiranje u računalnom programu *Solid Edge* i b) završni CAD model potpetice

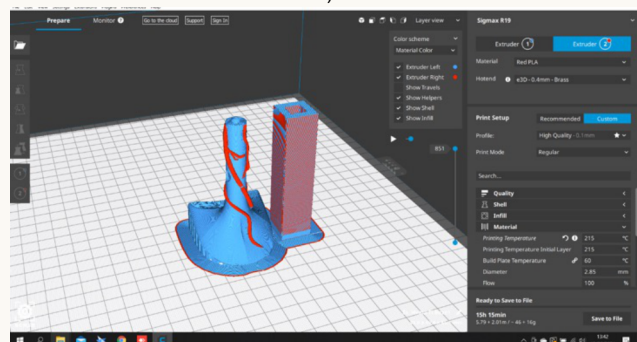
2.3. Priprema CAD modela prototipa potpetica za 3D ispis

Priprema dovršenih CAD modela potpetica za 3D ispis započinje spremanjem modela u obliku STL datoteke, koju je zatim potrebno obraditi u programu za generiranje G-koda, BCN3D Cura. Taj računalni program priprema model za 3D ispis, učitava model i stvara G-kod, što je neophodno za sam proces izrade na 3D pisaču. Tijekom pripreme u programu BCN3D Cura, nužno je definirati parametre 3D ispisa, uključujući poziciju i orijentaciju ispisa, kao i postavke poput debljine sloja, temperature mlaznice, temperature podloge, brzine ispisa, gustoće ispune i brzine ventilatora (hlađenja materijala). Odabir orijentacije 3D ispisa važan je parametar koji ovisi o obliku i geometrijskoj složenosti tvorevine te utječe na njezina mehanička svojstva, vrijeme izrade i količinu potporne strukture koju je naknadno potrebno ukloniti.

Budući da se potporna struktura kod postupka taložnog očvršćivanja (FDM) odvaja lomljenjem, ponekad se bira orijentacija koja produžuje trajanje 3D ispisa kako bi se izbjegle potporne strukture koje se teško uklanjaju. Za prototipe modela „Garbody 4.0 - srce“ (slika 8a) i „Garbody 4.0 - mozak“ odabrana je vertikalna orijentacija. Ova orijentacija je izokrenuta u odnosu na stvarni položaj potpetice, a cilj je bio izbjeći potporna strukturu te moguće vidljive tragove njenog odvajanja. Prototip potpetice „Garbody 4.0 - srce“ planiran je za ispis u dvije boje primjenom dva ekstrudera. Kod višebojnog ispisa koristi se početni toranj za izmjenu boja (engl. *prime tower*). Prilagodba mlaznice i filamenta na tom tornju provodi se prije 3D ispisa, pri čemu se kod svake promjene boje ili ekstrudera ispisuje početni sloj (slika 8b). To služi kako bi se izbjegle pogreške koje bi mogle nastati zbog nedovoljno zagrijane mlaznice.



a)



b)

Slika 8. Priprema 1. modela u *BCN3D Cura*: a) vertikalna orijentacija i b) dvobojni 3D ispis s poduporom

U tablici 1. prikazani su definirani parametri 3D ispisa za prototipove potpetica.

Tablica 1. Parametri 3D ispisa

Parametri 3D ispisa	Vrijednost
Debljina sloja	0,1 mm
Gustoća ispune	100 %
Brzina ispisa	50 mm/s
Temperatura mlaznice	200 °C
Temperatura podloge	60 °C

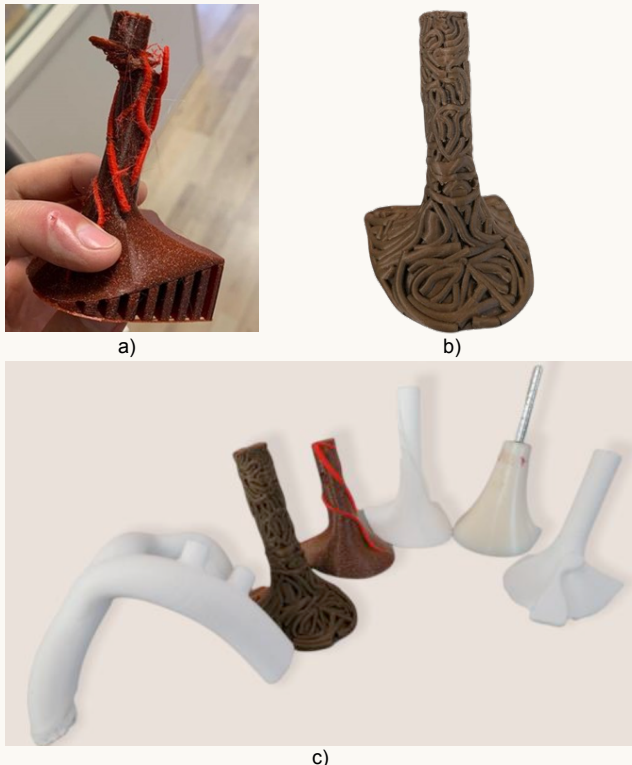
Program BCN3D Cura također omogućuje procjenu utroška materijala i vremena 3D ispisa. Ovi parametri ovisni su o definiranim parametrima navedenim u tablici 1. Utrošak materijala znatno se mijenja s promjenom debljine sloja i gustoće ispune dok na vrijeme ispisa utječe i postavljena brzina ispisa. U tablici 2 prikazani su predviđeni podaci vremena 3d ispisa i utrošak materijala za oba prototipa potpetica.

Tablica 2. Predviđeni utrošak materijala i vrijeme 3D ispisa

	Utrošak materijala	Vrijeme ispisa
Potpetica modela „Garbody 4.0 - srce“	52 g	16 h i 50 min
Dodatak na potpetici „Garbody 4.0 - srce“	56 g	14 h i 24 min
Potpetica modela „Garbody 4.0 - mozak“	42 g	12 h i 20 min

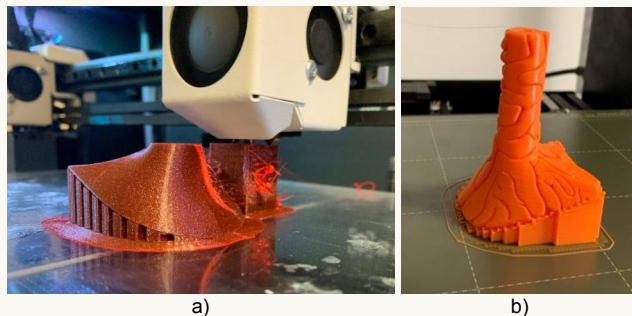
2.3.1. 3D ispis prototipova potpetica od polilaktida (PLA)

Postupak 3D ispisa potpetica iz polilaktida (PLA) započeo je probnim ispisima radi provjere CAD modela i uočavanja eventualnih pogrešaka. U jednoj fazi probnog ispisa, došlo je do pogreške u kojoj se ekstruder pomaknuo u odnosu na koordinatni sustav generiran G-kodom, što je rezultiralo deformiranim izgledom potpetice (slika 9a). Prvi 3D ispis prototipa modela potpetice „Garbody 4.0 - mozak“ napravljen je u neutralnoj boji (slika 9b). Pregledom tog prototipa ustanovljeno je da visina potpetice zatvara krivi kut u odnosu na dno kalupa, pri čemu bi težište tijela bilo usmjereno prema prstima, što bi moglo uzrokovati neudobnost i deformaciju stopala. Na slici 9c prikazani su greške i probni 3D ispisi pojedinih dijelova oba prototipa potpetica.



Slika 9. Probni 3D ispisi: a) deformiran izgled potpetice, b) pogrešno konstruirana potpetica i c) primjeri s greškama

Proces izrade prototipa na 3D pisaču započinje prijenosom G-koda na uređaj pomoću SD memorijske kartice. Materijal, koji je u obliku plastične žice promjera 2,85 mm polako se odmotava s koluta i dovodi do mehanizma za dostavu materijala. Materijal se zatim zagrijava do taljenja i izlazi kroz mlaznicu, čija je temperatura grijača postavljena na 200 °C. Rastaljeni materijal se polaže i lijepi na radnu podlogu ili na prethodno ispisani sloj, gdje se hladi i stvrdnjava. Nakon završetka jednog sloja, slijedi vertikalni pomak (u z-smjeru). Postupak nanošenja materijala sloj na sloj ponavlja se sve do završetka ispisa (slika 10). Nakon što su potpetice uklonjene s radne podloge 3D pisača, potrebno je odvojiti potporne strukture. Preostali nepotrebni ostaci i nečistoće uklanjaju se pažljivo pomoću brusnog papira.



Slika 10. 3D ispis prototipa potpetica: a) „Garbody 4.0 - srce“ i b) „Garbody 4.0 - mozak“

3. Rezultati

Rezultati rada obuhvaćaju fotografske zapise realiziranih gornjišta obuće i pripadajućih 3D ispisanih prototipova potpetica izrađenih od polilaktida (PLA) „Garbody 4.0 - srce“ i „Garbody 4.0 - mozak“. Konstrukcija krojnih dijelova, izrada gornjišta te proces montaže 3D ispisanih potpetica provedeni su u tvrtki *Ivančica d.d.* Ivanec uz pomoć stručnog tima.

Gornjište salonke sastoji se od dijelova lica, podstave, međupodstave, ojačanja i spužvice, s ugrađenom tvrdicom u prednjem dijelu. Industrijske faze izrade gornjišta uključivale su: krojenje, pripremu dijelova za sastavljanje (poput tehnološkog označavanja, porubnog stanjivanja i stabilizacije dijelova međupodstavom), podvijanje rubova, sastavljanje lica, lijepljenje podstave te sastavljanje lica i podstave. Slika 11 prikazuje realizirana gornjišta prototipova ženski salonke cipela.

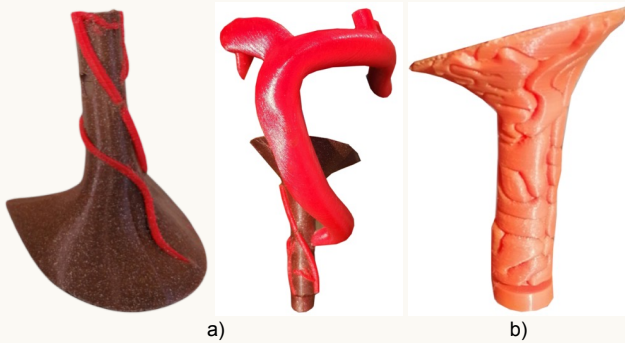


Slika 11. Realizirana gornjišta modela ženske salonke: a) „Garbody 4.0 - mozak“ i b) „Garbody 4.0 - srce“

Konstrukcija prototipova potpetica temeljila se na CAD modelima konstruiranim u računalnom programu Solid Edge, a 3D ispisane su na stolnom 3D pisaču BCN3D Sigmmax R19 iz PLA-a.

Za prototip potpetice „Garbody 4.0 - srce“ utrošak materijala iznosio je 52 g, a stvarni ispis trajao je 17 sati i 8 minuta. Dodatak na petnom dijelu istog modela zahtijevao je 56 g materijala i 14 sati i 49 minuta ispisa.

Potpetica prototipa „Garbody 4.0 - mozak“ ispisana je za 12 sati i 43 minute, uz utrošak materijala od 42 g. Usporedbom s predviđenim procjenama prikazanim u tablici 1 vidljivo je da su stvarne vrijednosti utroška materijal i vremena 3D ispisa nešto više u odnosu na procjenjene.



Slika 12. Realizirani prototipovi potpetica modela: a) „Garbody 4.0 - srce“ i b) „Garbody 4.0 - mozak“

Spajanje gornjih i donjih dijelova ženskih salonka cipela (montaža) započelo je ugradnjom montažnog luba. Tehnološki procesi montaže uključivali su niz koraka: pričvršćivanje tabanice na kalup, strojno navlačenje prednjeg i petnog dijela na kalup, navlačenje stranica gornjišta, brušenje upusta, premazivanje upusta i potplata ljepljivom, lijepljenje i prešanje potplata, sušenje te pričvršćivanje 3D ispisanih prototipova potpetica. Nakon što je potplat pričvršćen, uklanja se kalup, umeće se uložna tabanica, a zatim slijedi finiširanje koje obuhvaća čišćenje gornjišta od ostataka ljepljiva i olovke, završno poliranje i apretiranje. Slika 13 prikazuje realizirani prototip modela „Garbody 4.0 - srce“, a slika 14 prototip modela „Garbody 4.0 - mozak“.



Slika 13. Realizirani prototip modela „Garbody 4.0 - srce“



Slika 14. Realizirani prototip modela „Garbody 4.0 - mozak“

4. Zaključak

Primjena suvremenih tehnologija uvelike je doprinijela preciznoj i dojmljivoj vizualizaciji autorskog koncepta i dizajna cipela opisanog i prikazanog u prvom djelu rada „Dizajn, istraživanje i razvoj kolekcije ženskih cipela visokih potpetica primjenom 3D ispisa od polilaktida“ (K&O vol. 73 no. 3/2024). Proces razvoja prototipova potpetica, od ideje do realizacije, pokazao je da su za uspješnu realizaciju osmišljenog proizvoda neophodne brojne vještine, uključujući poznavanje računalnog modeliranja CAD modela, znanja za rad sa stolnim 3D pisačem te odabir odgovarajućih polimera u skladu s materijalima. Velika prednost 3D ispisa očituje se u mogućnosti brzog opredmećivanja kompleksnih dizajnerskih rješenja kroz izradu prototipa. Ipak, ukoliko je cilj izrada nekonvencionalnih oblika potpetica za maloserijsku proizvodnju, nužno je provesti temeljita istraživanja o isplativosti izrade, kompatibilnosti materijala u skladu s primjenom.

Literatura

- [1] Jandyal A. et al.: 3D printing - A review of processes, materials and applications in industry 4.0, *Sustainable Operations and Computers* **3** (2022), 33-42
 - [2] Godec D. et al.: A guide to additive manufacturing, introduction to additive manufacturing, Springer Cham 2022, 1-43
 - [3] Vanderploeg A. et al.: The application of 3D printing technology in the fashion industry, *International Journal of Fashion Design, Technology and Education* **10** (2017), 170-179
 - [4] Tamaşag, I et al.: Experimental Study on the Possibilities of FDM Direct Colour Printing and its Implications on Mechanical Properties and Surface Quality of the Resulting Parts, *Polymers* **14** (2022), 5173
 - [5] BCN3D Sigmax R19: User Manual, URL: <https://www.bcn3d.com/sigmax-getting-started/>, Pristupljeno: 2025-12-4
 - [6] Solid Edge: User Manual, URL: <https://solidedge.siemens.com/>, Pristupljeno: 2025-12-4
 - [7] Mukherjee M.: Effect of build geometry and orientation on micro-structure and properties of additively manufactured 316L stainless steel by laser metal deposition, *Materialia* 2019, 7100359
 - [8] Kutnjak-Mravlinčić S. et al.: Influence of orientation on mechanical properties in fused deposition modelling / Utjecaj orijentacije na mehanička svojstva kod taložnog očvršćivanja, *Koža i obuća*, **68** (2020) 4/19, 4-13
 - [9] Aki Choklat: Footwear design, Laurence King Publishing, 2012, 192
 - [10] Wade Motawi: How shoes are made: A behind the scenes look at a real sneaker factory, Wade Motawi, 2017, 198
 - [11] Stojko S.: Oblikovanje ženskih cipela primjenom 3D ispisa visokih potpetica od polilaktida, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Studijska jedinica Varaždin, 2021
-