



OPTIMIZACIJA CNC TEHNOLOGIJE PRI IZDELAVI UMETNIŠKEGA IZDELKA

OPTIMIZATION OF CNC TECHNOLOGY IN THE MANUFACTURING PROCESS OF AN ARTISTIC PRODUCT

Katarina Remic¹, Miran Merhar^{1*}

UDK 674.057:004.896

Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 30. 10. 2020

Sprejeto / Accepted: 20. 11. 2020

Izveček / Abstract

Izveček: V delu smo izvedli analizo optimizacije procesa obdelave umetniškega lesenega izdelka (okvir ogledala) na 3-osnem CNC stroju. Iz grafične slike smo najprej v programu ArtCAM izdelali 3D model, triangulirali njegovo površino in ustvarili STL datoteko. To smo naložili v program SolidWorks, kjer smo z njegovim dodatkom SolidCAM določili parametre obdelave. Grobo obdelavo smo določili z operacijami HSR (high speed roughing), fino pa s HSM (high speed machining). Posamezne operacije smo primerjali in ugotovili, da bi najkrajši čas obdelave pri najboljši kvaliteti dobili pri izbiri HSR operacij »Contour Roughing« nato »Rest Roughing« ter HSM operacije »3D Constant Step Over«, znašal pa bi 4 ure in 1 minuto. Izdelano kodo smo preverili s simulacijo izdelave ter na koncu izdelali G kodo za naš izdelek.

Ključne besede: CNC, les, pohištvo, rezkanje, SolidCAM, SolidWorks

Abstract: The work analyses the optimisation of the manufacturing process of an artistic wooden product (mirror frame) with a 3-axis CNC machine. The 3D model was first made in ArtCAM, from where the STL file was later uploaded to SolidWorks. The parameters for the HSR (high-speed roughing), and HSM (high-speed machining) operations were determined in SolidCAM. The findings show that a combination of operations from HSR and HSM are the best choice, considering the shape of the model and the capabilities of the machine, as the best ratio between the quality of the surface and the time needed for the operation is provided by these. Operations differ with regard to the tool path and parameters that can be adjusted. The operations were compared and the best results are achieved when the HSR operations "Contour Roughing" and then "Rest Roughing" are used and when the HSM operation "3D Constant Step Over" is used, where the machining time amounted 4 hours and 1 minute. Finally the G code was made for our product.

Keywords: CNC, wood, furniture, milling, SolidCAM, SolidWorks

1 UVOD

1 INTRODUCTION

Rezbarjeno pohištvo je bilo skozi stoletja simbol spretnosti izdelovalca (Auslander, 1998), kvaliteta površine pa je bila odvisna tudi od uporabljene drevesne vrste (Merhar et al., 2020). Takšnih mojstrov danes skoraj ni več, po drugi strani pa ročno rezbarjenje zahteva ogromno časa. Pojavila se je polavtomatizirana rešitev: rezkanje na CNC (Computer Numerical Controlled) stroju. Večsni računalniško krmiljeni (CNC) stroji omogočajo izdelavo podobnih umetniških izdelkov in stilskega pohištva, za svoje delovanje pa potrebujejo G-kodo. To lahko generiramo s CAM (Computer Aided Manufacturing) programsko opremo, pri čemer določimo obdelovalne operacije, tako da je izdelava

čim bolj optimalna, kvaliteta obdelane površine pa čim boljša (Koleda et al., 2019; Merhar et al., 2019; Jovanović et al., 2020). Operacije se razlikujejo glede na vrsto in zahtevnost izdelka. Z izbiro pravih operacij ustvarimo primerno G-kodo, stroj pa nam izdelava lep, kakovosten izdelek (Balič & Pahole, 2008). Problem se lahko pojavi, kadar nimamo na voljo ustreznega oz. primerne računalniškega modela ali pa je ta neustrezne kvalitete. Zato je potrebno skrbno pripraviti računalniški model izdelka, ki ga želimo izdelati.

Stereolitografirane datoteke (STL) so bile razvite z namenom olajšanja hitre izdelave prototipov in so kmalu postale aktualne v modeliranju (Rypl & Bittnar, 2006). STL modeli predstavljajo triangulirano površino oz. mejo telesa. Algoritmi, ki ustvarijo trikotnike, so zelo natančni, vendar pa nastali model ni geometrijsko identičen izhodišču. Površina namreč ni sestavljena iz krivin in kompleksnih geometrijskih oblik, ampak iz ogromno

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, SLO

* e-pošta: miran.merhar@bf.uni-lj.si

majhnih trikotnikov. Pogosto se takšna triangulacija uporablja pri metodi končnih elementov, pri tem reguliramo in spremljamo kakovost trikotnikov tako, da upoštevamo dolžino stranic trikotnika. Zahtevana kvaliteta je odvisna od primera do primera (Béchet et al., 2002). Velikokrat se zgodi, da je površina izdelana iz prevelikih trikotnikov, ki so najbolj problematični, saj ne zagotavljajo zadostne kakovosti površine. V takšnih primerih je potrebno »glajenje« oziroma manjšanje trikotnikov. Površina se razdeli na manjše interpolirane podenote, kar imenujemo »Butterfly scheme«. V zadnji fazi rekonstrukcije se generira mreža (»mesh«), ki jo sestavljajo občutno manjši trikotniki (Rypl & Bittnar, 2006).

Nadgradnja programa SolidWorks je mogoča z dodatkom SolidCAM, ki je namenjen načrtovanju strojniške obdelave ter izdelavi G kode. Glede na model, ki ga želimo obdelati, izberemo stroj, poti obdelave in vrsto rezkalnega orodja. Program ponuja različne možnosti obdelave z različnimi oblikami orodij (Face Mill, Bull Nose Mill, End Mill, Lollipop Mill, Ball Nose Mill, Taper Mill, Slot Mill ...). Pri obdelavi STL modelov se uporabljajo operacije »iMachining«, ki avtomatizirano ustvarja poti gibanja orodja, da dosežemo čim večjo učinkovitost obdelave. iMachining zajema operaciji HSR (High Speed Roughing) in HSM (High Speed Milling) za 3-osne CNC stroje in strategije za 5-osne CNC stroje. Pred začetkom moramo definirati geometrijo (tridimenzionalen model, ki ga želimo obdelati), orodje (ustvarimo in shranimo lahko poljubno število orodij, ki jim določimo parametre), omejitve (meja rezkanja), prehode (globina odvzema), način prehajanja in gibanja orodja ter dodatne specifikacije, ki so vezane na vrsto izbrane operacije (SolidCAM, 2015).

Namen raziskave je preučiti tehnološke postopke obdelave stilskega okvirja ogledala ter izdelati tridimenzionalen (3D) računalniški model, zanj izbrati primerne operacije oz. kombinacije operacij ter generirati G-kodo, s katero bi lahko izdelali naš izdelek tudi na CNC stroju. Še posebej smo se osredotočili na izdelavo ustreznega računalniškega modela izdelka ter izbiro pravih operacij, kar nam je služilo kot osnova za izdelavo G kode.

2 MATERIAL IN METODE

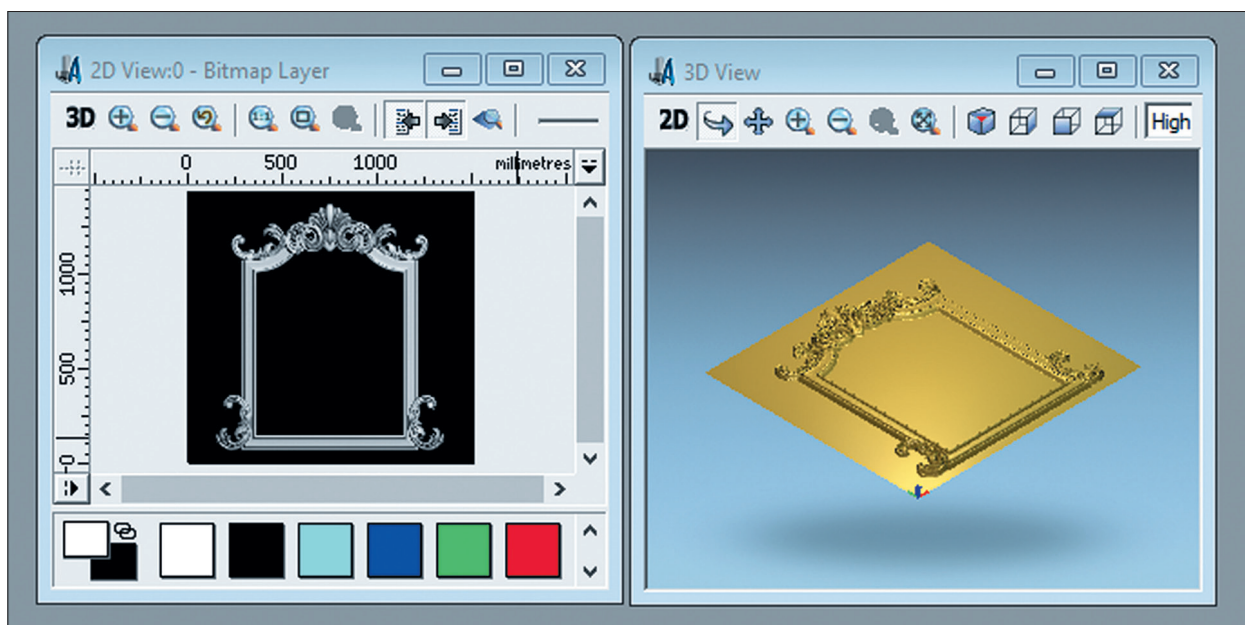
2 MATERIALS AND METHODS

Izhodiščno sliko stilskega okvirja ogledala, ki je bila HD (High Definition) resolucije, smo odprli v programu Adobe Photoshop CC, in najprej dodali »Layer« črne barve, mu izbrisali »Layer Mask« in ga hierarhično umestili pod izhodiščno sliko. Nato smo z orodjem »Quick Selection Tool« natančno označili ozadje in pazili, da pri tem ne označimo delov okvirja. Izbrali smo »Select Inverse« in nato pravilnost označenega dela preverili s ukazom »Quick Mask«. Program ArtCAM globine modela določa po sistemu barv. Ker črna barva predstavlja globino 0 mm, smo morali ozadju spremeniti barvo v enotno, črno. Ko smo bili z natančnostjo izbire zadovoljni, smo z ukazom »Select and Mask« odstranili ozadje, pri tem pa smo za željeno izhodišče izbrali »Layer« črne barve, ki smo ga predhodno ustvarili. Dobili smo barvni model na črnem ozadju, zato smo v zavihku »Image« izbrali podkategorijo »Mode« in sliko iz RGB (red, green, blue) barvne palete spremenili v »Grayscale«.

2.1 OBLIKOVANJE STL MODELA

2.1 STL MODELING

Urejeno sliko smo naložili v program ArtCAM (ArtCAM). Izbrali smo novo datoteko in sicer možnost »From Image File«. Izbrali smo možnost metode določevanja »Image Size« in določili širino 1500 mm, višino pa je program glede na razmerje stranic izračunal sam (1428,5 mm). Ker smo imeli na sliki okoli modela še nekaj ozadja, je to pomenilo, da bo model nekoliko manjših dimenzij od tistih, ki smo jih določili. Že na začetku smo določili maksimalno višino, ki je bila 35 mm. Program nam je po potrditvi dimenzij odprl dva okna, enega z dvodimenzionalno sliko in enega z izhodiščem za 3D model (slika 1). 2D sliko bi lahko še urejali v programu ArtCAM, vendar to ni bilo potrebno, saj smo vse opravili že v Photoshopu. Naš model je bil že v začetku razmeroma dobre kvalitete, vendar je bila za izdelavo primerne površine pregraba. V orodjarni v razdelku »Relief tools« smo zato izbrali operacijo »Smooth Relief«, s katero smo zgladili površino. Optimalno gladkost geometrije smo dosegli s štiri-mi prehodi glajenja. Nato smo, prav tako v razdelku »Relief Tools«, izbrali operacijo »Create Triangle Mesh«. Za parametre triangulacije smo določili toleranco 0,01 mm in izbrali možnost izdelave modela



Slika 1. 2D slika in osnutek 3D modela v programu ArtCAM

Figure 1. 2D picture and 3D model draft in ArtCAM



Slika 2. Končan STL model

Figure 2. Final STL model

z ravno hrbtno površino («Close With A Flat Plane») ter z ukazom «Create Triangles» izdelali triangulirano površino. Dobljeno geometrijo, ki je bila sestavljena iz 221656 trikotnikov, smo shranili kot «Binary STL File» in jo izvozili kot STL model (slika 2).

2.2 PROGRAMIRANJE IN OPERACIJA HSR

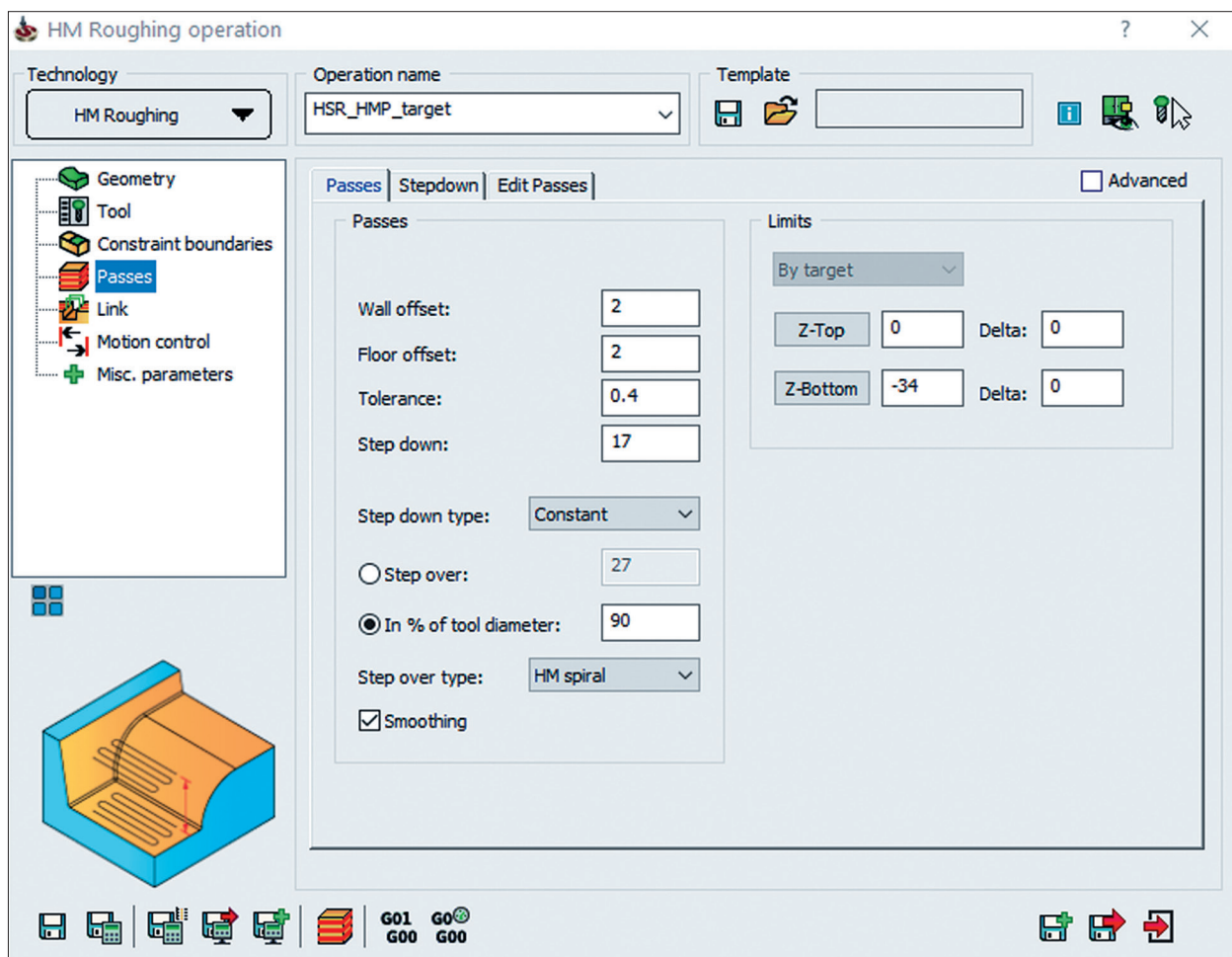
2.2 PROGRAMMING AND HSR OPERATION

V programu SolidWorks smo izdelali surovec. Naš STL model je imel dimenzije 1257 mm x 1347,5 mm x 33,5 mm, surovec smo izdelali z nekaj milimetri nadmere. V programu SolidCAM smo uporabili ukaz «New Milling STL» in naložili našo STL datoteko. Izbrali smo CNC obdelovalni stroj in sicer 3-osni FANUC. Koordinatni sistem smo za začetek določili pravokotno na površino z ukazom «Normal to Current View». Določili smo surovec («Stock»), katerega dimenzije smo določili glede na dimenzije modela z ukazom «Take Model Dimensions». Nato smo z ukazom «Insert Components» naložili prej ustvarjen surovec, ki smo ga z ukazi «Mate» poravnali tako, da smo popolnoma prekrili STL model. Ponovno smo izbrali surovec («Stock»), tokrat smo za način določevanja izbrali možnost «3D Model» in nato kot CAD model izbrali surovec, ki smo ga naložili. Popravili smo koordinatni sistem, tako da smo za način določevanja izbrali možnost s tremi točkami in označili tri kote surovca, da je bil koordinatni sistem postavljen v spodnji levi kot. Začeli smo z operacijo HSR, kjer smo surovec grobo obdelali. Z ukazoma «Add Milling Operation» in nato «3D HSR» smo izbrali tip obdelave. HSR ima več možnosti obdelave, zato smo izbrali vrsto tehnološkega procesa. Kot prvo varianto smo preverili

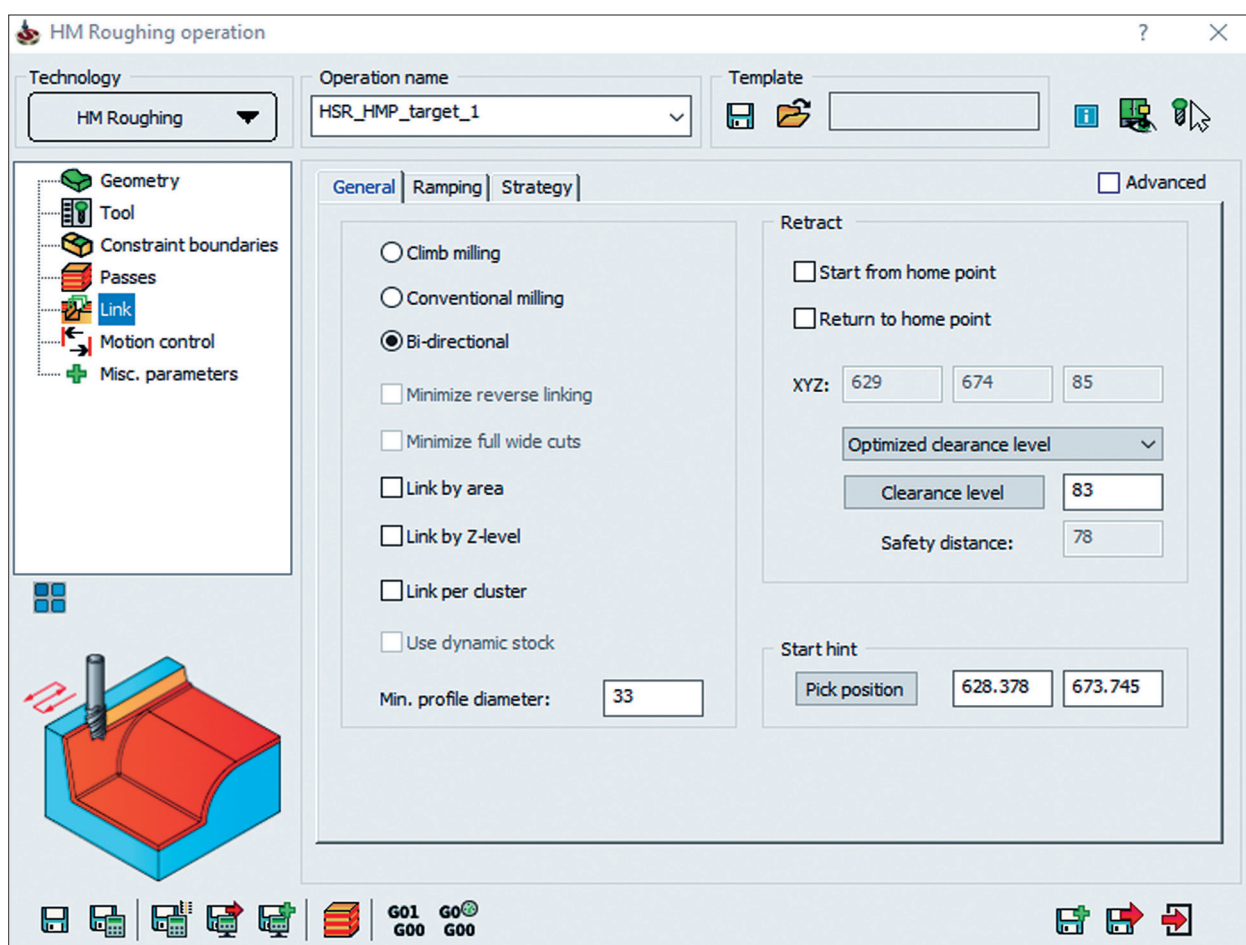
»HM Roughing«. Izbrali smo že prej oblikovan koordinatni sistem »MAC 1 (1-Position)«, za tarčo obdelave pa smo izbrali STL model. Izbrali smo rezkar tipa »END MILL« s premerom 30 mm, maksimalno globino rezkanja 38 mm in podajno hitrostjo 2500 mm/min. Omogočili smo funkcijo samodejnega izračuna dolžine orodja (»Calculate minimum tool length«). Ročno smo nastavili omejitve, tako da smo izbrali zgornji zunanji in zgornji notranji rob surovca, »Boundary – Tool Relation« pa smo določili kot »External«. V prehodih (»Passes«) smo določili rezkanje z nadmero 2 mm od stene in tal modela s toleranco 0,4 mm. Korak odzemanja materiala po globini smo izbrali 17 mm, tip odzemanja materiala po globini pa je bil »Constant«. Prehode orodja po širini smo določili kot premik za 90 % premera rezkarja, način prehodov pa smo izbrali »Cavity« (slika 3).

Za zgornjo smo izbrali 0 mm, za spodnjo mejo operacije pa -34 mm. V razdelku »Stepdown« smo izbrali možnost »Optimize Z level« in določili, da je zadnji nivo posnemanja debeline 0 mm. Pri izbiri poti (»Link«) smo se odločili za »Bi-directional«, saj bo tako rezkar obdeloval v obe smeri gibanja. Minimalni premer profila za rezkanje je bil določen avtomatsko (33 mm). Kot način posnemanja materiala smo izbrali »Plunge ramping«, kjer se rezkar postopoma ugresa (slika 4).

Z ukazom »Save and Calculate« smo operacijo shranili in hkrati preverili, pravilnost nastavitvev. V nasprotnem primeru bi nam program javil napako. Program nam izriše potek poti (slika 5). Ustreznost parametrov smo nato preverili še s simulacijo operacije v načinu »Solid Verify«. Ker smo želeli najti najbolj optimalno operacijo, smo preverili še ostale možnosti, ki nam jih ponuja program SolidCAM. Pa-



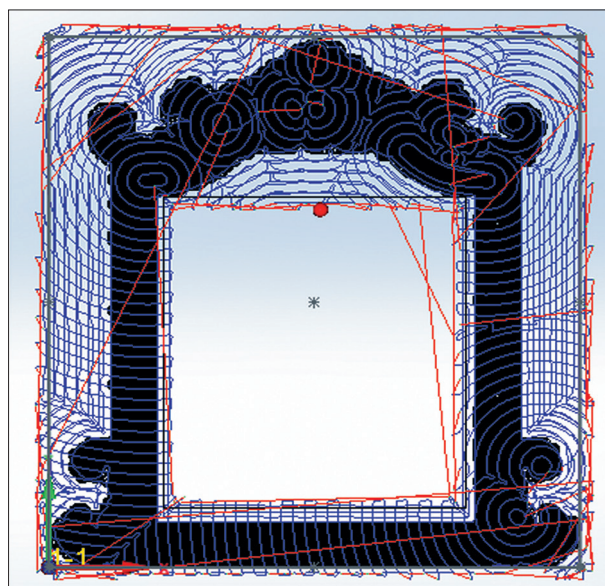
Slika 3. Parametri „Passes“ pri operaciji »HM Roughing«
 Figure 3. „HM Roughing“ operation „Passes“ parameters



Slika 4. Parametri „Link“ pri operaciji »HM Roughing«
 Figure 4. “HM Roughing” operation “Link” parameters

parametri in nastavitve geometrije, orodja in omejitev so ostali enaki. Korake globine odvzema in odmike orodja po širini pa smo določili čim bolj primerljivo. Preverili smo še operaciji »Contour Roughing« in »Hatch Roughing«.

Izhodišče za naslednjo operacijo je predstavljala operacija »Contour Roughing«. Z desnim klikom na to operacijo v drevesu se nam odprejo možnosti, izbrali smo »Add Milling Operation« in nato »3D HSR«. Želeli smo grobo odstraniti še preostali material, ki ga z večjim rezkarjem nismo mogli, zato smo za tip obdelave izbrali »Rest Roughing«. Geometrija je bila izbrana že od prejšnje operacije. Izbrali smo rezkar tipa »BALL NOSE MILL« s premerom 12 mm, maksimalno globino odvzema 24 mm in podajno hitrostjo 3000 mm/min. Omogočili smo funkcijo »Calculate minimum tool length«. Za omejitve (»Constraint boundaries«) smo omogočili avtomatsko izbiranje. V prehodih smo določili ko-



Slika 5. Izrisana pot orodja pri operaciji »HM Roughing«
 Figure 5. “HM Roughing” operation tool path

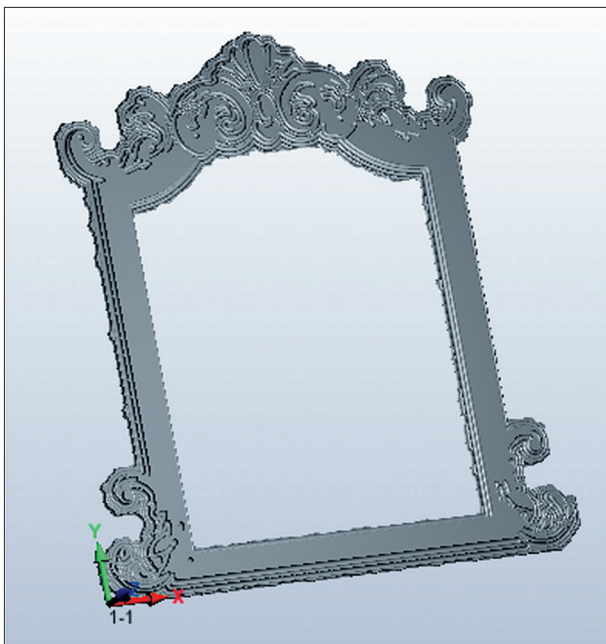
rak odzemanja materiala po globini (12 mm) in izbrali, da rezkamo z nadmero 2 mm od stene in tal ter toleranco 0,4 mm. Minimalni pomik orodja po širini smo določili kot 6,5 mm, maksimalni pomik pa smo omogočili in je znašal 11,7 mm. Omejitve »Z-Top« in »Z-Bottom« smo določili glede na zgornji in spodnji rob surovca. V zavihku »Adaptive step down« smo določili avtomatsko dodajanje prehodov kot »None« in omogočili optimiziranje nivoja po globini, pri tem smo za zadnji nivo odstranjevanja materiala izbrali 2 mm. Pot orodja smo izbrali kot »Bi-directional«, pri tem je bil minimalni premer profila za posnemanje materiala 0 mm. V zavihku »Ramping« smo izbrali način »Plunge ramping«. Za kontrolo operacije smo po shranjevanju z ukazom »Save and Calculate« izvedli simulacijo s »Solid Verify« (slika 6).

2.3 OPERACIJA HSM

2.3 HSM OPERATION

Bolj natančno in fino smo naš model obdelali z izbiro operacije »3D HSM«. Z desnim klikom na operacijo »Rest Machining«, ki je izpisana v drevesu operacij, se nam odpre možnost »Add Milling Operation«, izbrali smo »3D HSM«. Najprej smo

preverili tip operacije »Constant Z Machining«, kjer orodje v enakih korakih odvzema material po globini. Geometrija rezkanja je bila izbrana že od prej, prav tako koordinatni sistem. Izbrali smo isti rezkar kot pri operaciji »Rest Roughing« ter omogočili možnost »Calculate minimum tool length«. Meje obdelave smo določili z avtomatskim generiranjem (»Created automatically«) glede na ciljno geometrijo, »Boundary – Tool Relation« pa smo določili kot »External«. V prehodih smo določili, da rezkamo z nadmero 0,5 mm od tal in od stene, saj smo predpostavili, da bo po končani obdelavi potrebno še ročno brušenje in smo želeli ohraniti debelino. Hkrati smo dosegli manj izrazit relief, ki prikrije morebitna odstopanja, ki bi lahko nastala pri triangulaciji. Korak odvzema po globini je bil 1,5 mm, omogočili smo funkciji »Smoothing« in »Detect flat areas«. »Z-top« in »Z-bottom« sta bila določena glede na najvišjo in najnižjo točko surovca. Izbrali smo možnost avtomatskega dodajanja prehodov (»Automatically insert extra passes«), z natančnostjo 0,1 mm in pomikom orodja po širini 1,5 mm. Omogočili smo funkcijo »Optimize Z level« in določili debelino zadnjega prehoda 0 mm. Najmanjši odzem materiala po debelini smo določili kot 0,5 mm. Smer odvze-



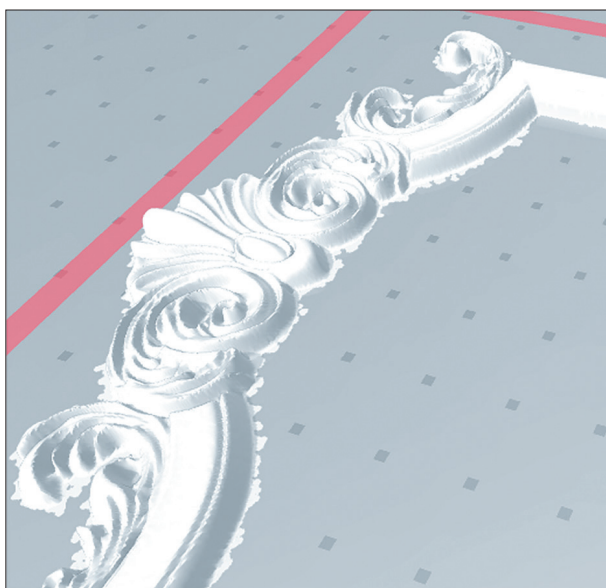
Slika 6. Surovec po »Solid Verify« simulaciji operacije »Rest Roughing«

Figure 6. Workpiece after »Solid Verify« simulation for »Rest Roughing« operation



Slika 7. Surovec po operaciji »Constant Z Machining«

Figure 7. Workpiece after »Constant Z Machining« operation



Slika 8. Tekstura STL modela pri enem prehodu glajenja
Figure 8. The texture of the STL model after one smoothing pass



Slika 9. Tekstura STL modela pri desetih prehodih glajenja
Figure 9. The texture of the STL model after ten smoothing passes

manjša smo definirali kot »Bi-directional«. Za strategijo smo določili posnemanje »Profile ramping«. Največji kot za posnemanje smo določili 10°, najmanjši premer posnemanja pa 0,01 mm. Operacijo smo shranili z ukazom »Save and Calculate«. Kvaliteto operacije smo preverili s »Solid Verify« simulacijo, ki nam je pokazala izgled in gladkost končne površine (slika 7). Pri enakih oziroma primerljivih parametrih smo preverili še operacije »Hybrid Constant Z«, »Helical Machining«, »Linear Machining«, »Radial Machining«, »Spiral Machining«, »Morphed Machining«, »3D Constant Step Over«, »3D Corner Offset«, »Offset Cutting« in »Parallel Pencil Milling«.

2.4 VPLIV STL MODELA

2.4 EFFECT OF THE STL MODEL

Preden smo pričeli s primerjavo operacij, smo morali izdelati primerno STL datoteko. Pozorni smo morali biti, da smo površino predhodno dovolj zgladili. Tako smo zagotovili, da trikotniki, ki so nastali pri triangulaciji površine, niso bili preveliki. V primeru prevelikih trikotnikov bi bila geometrija površine našega okvirja neustrezna. Gladkost smo zagotovili s štirimi prehodih glajenja v programu ArtCAM. Pri manj prehodih bi bila površina bodičasta, pri več prehodih pa bi površina postala preveč ploščata,

relief pa bi bil plitek. Če bi model zgladili samo z enim prehodom, bi bila površina pregroba (slika 8) in tekstura preveč izrazita. Če pa bi model zgladili z 10 prehodih, bi bila tekstura preveč zabrisana (slika 9). Čeprav bi imeli več trikotnikov (237236), nam v tem primeru to ne bi omogočilo bolj kvalitetnega izdelka.

3 REZULTATI IN RAZPRAVA

3 RESULTS AND DISCUSSION

Optimizacijo CNC tehnologije pri izdelavi umetniškega izdelka smo izvedli s primerjavo različnih vrst operacij in poiskali takšno kombinacijo le-teh, da je bilo razmerje med kakovostjo in časom izdelave najboljše, saj v praksi CNC stroja ne moremo obremeniti za več dni za izdelavo enega samega izdelka.

Pri grobi obdelavi smo spremljali različne kakovosti površin pri različnih variantah operacije HSR. Upoštevati smo morali omejitve uporabljenega rezkarja. Izbrali smo rezkar z relativno velikim premerom, da nam groba obdelava ne bi vzela preveč časa, zaradi česar v prvi operaciji nismo mogli globo porezati reliefa našega modela. To je pomenilo, da smo po končani prvi operaciji HSR morali dodati še operacijo »Rest

Roughing«. Hkrati rezkarja nismo želeli preveč obremeniti, zato odvečnega materiala v prvi HSR operaciji nismo odstranili v enem prehodu ampak v dveh (pomik orodja po globini smo izbrali 17 mm, po širini pa 27 mm). Med seboj smo primerjali operacije »HM Roughing«, »Contour Roughing« in »Hatch Roughing«. Izpustili smo operacijo »Hybrid Ryb Roughing«, saj je namenjena zelo specifični operaciji (rezkanje tankih sten). Na tej točki obdelave kakovost površine za nas ni bila ključnega pomena, osredotočili smo se na hitrost obdelave. Pri primerljivih parametrih smo primerjali potrebne čase za izvedbo. Izbrana podajna hitrost je bila 2500 mm/min, če bi izbrali npr. 1000 mm/min, bi bil čas obdelave daljši. Želeni rezultat smo najhitreje dosegli z operacijo »Contour Roughing« (preglednica 1), zato smo jo izbrali kot ustrezno in na podlagi te operacije izvajali nadaljnje.

Preglednica 1. Časi trajanja prve operacije HSR rezkanja pri primerljivih parametrih

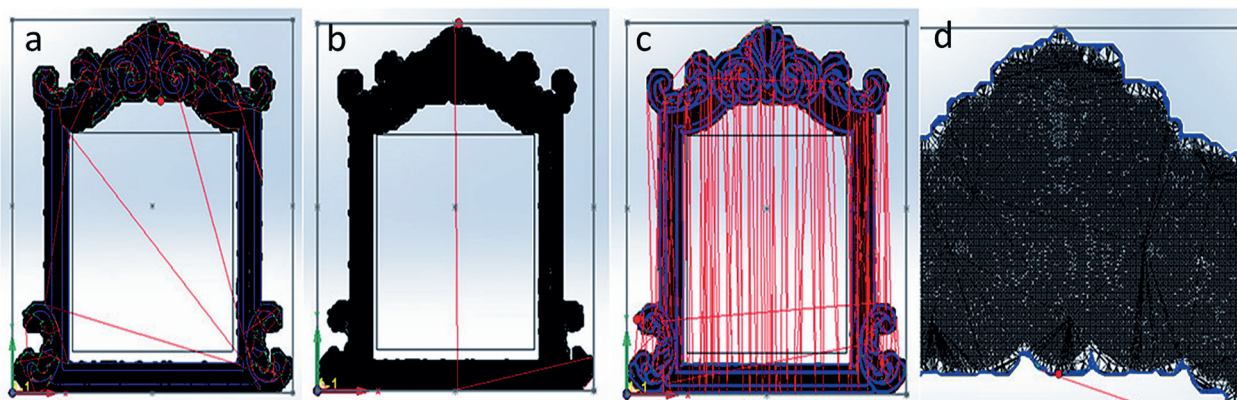
Table 1. Times needed for the first HSR milling operation with comparable parameters

Vrsta operacije	Čas trajanja operacije [h:min:s]
HM Roughing	0:51:46
Contour Roughing	0:28:22
Hatch Roughing	0:37:45

Z operacijo »Rest Roughing« smo nato grobo porzekali še preostali odvečen material, kar nam je v nadaljnjih operacijah (HSM) skrajšalo čas. Izbrali smo manjši rezkar s premerom 12 mm, da smo lahko grobo obdelali tudi detajle. Pomik orodja po globini smo izbrali 12 mm, po širini pa smo določili minimalni pomik (6,5 mm) in maksimalni pomik (11,7 mm). Ker je bil odvzem materiala manjši kot pri prejšnji operaciji, smo določili večjo podajno hitrost (3000 mm/min). Operacija »Rest Roughing« bi bila izvedena v 28 minutah in 51 sekundah.

Pri fini obdelavi (operacija HSM) smo uporabili isti rezkar kot pri operaciji »Rest Roughing«. Zaradi oblike rezkarja (»BALL NOSE MILL«) smo lahko dosegli večjo gladkost površine in manj izrazite raze, pod pogojem da je bil pomik orodja po globini dovolj majhen. Pri vseh variantah HSM operacije smo uporabili primerljive parametre: pomik orodja po globini in širini je bil 1,5 mm, smer rezkanja pa »Bi-directional«. Zaradi neustreznosti smo že vnaprej izločili nekaj vrst operacij, pri katerih pot orodja ni pokrivala celotne površine našega modela (slika 10). Izločili smo operacije: »Boundary Machining«, »Horizontal Machining«, »Pencil Milling« in »Rest Machining«.

Ker smo želeli najti najbolj optimalno operacijo, smo morali upoštevati tako čas, potreben za izvedbo kot končno kvaliteto površine. V preglednici 2 lahko vidimo čase, potrebne za izvedbo posameznih operacij HSM. Da bi bili časovno učinkoviti, smo izločili vse operacije, ki bi za izvedbo potrebovale več kot 3 ure in pol. Tako smo izločili »Constant



Slika 10. Poti orodja pri operacijah. a) »Rest Machining«, b) »Boundary Machining«, c) »Pencil Milling« in d) »Horizontal Machining«

Figure 10. Tool paths for "Rest Machining", "Boundary Machining", "Pencil Milling" and "Horizontal Machining" operations

Z Machining«, »Helical Machining«, »Radial Machining«, »Morphed Machining«, »3D Corner Offset« in »Parallel Pencil Milling«.

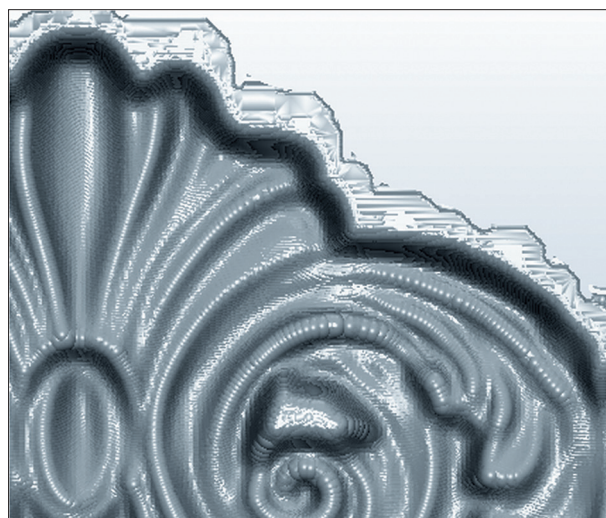
Preglednica 2. Časi trajanja prve operacije HSM rezanja pri primerljivih parametrih

Table 2. Times needed for the first HSM milling operation with comparable parameters

Vrsta operacije	Čas trajanja operacije [h:min:s]
Constant Z Machining	3:33:25
Hybrid Constant Z	3:07:44
Helical Machining	3:40:54
Linear Machining	2:43:40
Radial Machining	4:43:52
Spiral Machining	2:36:17
Morphed Machining	4:35:51
3D Constant Step Over	3:04:18
3D Corner Offset	3:30:22
Offset Cutting	2:54:45
Parallel Pencil Milling	3:30:22

Nato smo med seboj primerjali kakovost površine pri preostalih operacijah. To so bile: »Linear Machining«, »Spiral Machining«, »Hybrid Constant Z«, »Offset Cutting« in »3D Constant Step Over«. Pri operacijah »Linear Machining«, »Spiral Machining« in »Offset Cutting« so prehodi orodja enakomerni in ni opaziti, da bi orodje kje zašlo globlje v surovec. Vendar pa so zaradi načina gibanja/poti orodja, raze vidne in moteče, saj ne potekajo vzporedno z geometrijo našega modela, zato smo te operacije izločili.

Pri operaciji »Hybrid Constant Z« so bili nekateri prehodi orodja po krivinah prekinjeni, zato smo opazili dele površine, ki niso bili dovolj enakomerni. Raze tečejo v smeri geometrije modela in niso moteče. Operacija »3D Constant Step Over« nam je dala najboljše rezultate. Površina je enakomerno obdelana (nekoliko slabše kot pri »Linear Machining«, vendar občutno bolj kot pri »Hybrid Constant Z«). Raze so neizrazite, delno vzporedne z geometrijo modela (slika 11). Pri izbiri operacij »Contour Roughing«, »Rest Roughing« in »3D Constant Step Over« bi za izdelavo našega modela potrebovali 4 ure 1 minuto in 31 sekund. Po izboru operacije smo z desnim klikom na »Operations« v drevesu izbrali »GCode All« in nato »Generate« ter izdelali G kodo za naš program.



Slika 11. Smer in izrazitost raz na surovcu po operaciji »3D Constant Step Over«

Figure 11. Course and distinctness of scratches on workpiece after "3D Constant Step Over" operation

4 ZAKLJUČKI

4 CONCLUSIONS

V raziskovalnem delu smo prikazali izdelavo programa za obdelavo umetniškega izdelka (okvirja za ogledalo) na 3-osnem CNC stroju. Model smo ustvarili iz dvodimenzionalne slike, ga pretvorili v 3D obliko in površino triangulirali, da smo dobili STL model, ki je služil kot definicija geometrije površine za obdelavo na CNC stroju. Dosegli smo cilj optimizacije, ki sta nam ga omogočili zelo hitri a za uporabnika enostavni operaciji HSR in HSM. Do napak lahko pride zaradi nepravilno določenih mej obdelovanja, v tem primeru bi rezkar zašel v telo izdelka in ga poškodoval ali pa bi določen del izdelka ostal neobdelan.

Celoten proces obdelave je dokaj zamuden, saj bi z uporabo naše G-kode potrebovali 4 ure 1 minuto in 31 sekund, da bi dobili želen izdelek. V praksi je kljub natančni izdelavi in majhnemu koraku odvzema potrebno še ročno brušenje raz. Kakovost končnega izdelka bi lahko izboljšali z uporabo manjšega koraka odvzema in rezkarjev z manjšim premerom, s čimer bi dosegli večjo gladkost površine, vendar pa bi to bistveno podaljšalo čas izdelave. Naš program je bil ustvarjen za 3-osni stroj, če bi okvir izdelovali na 5-osnem, bi bil izdelek končan hitreje.

5 POVZETEK

5 SUMMARY

The work carried out in this study determined the optimal milling operation for manufacturing an artistic product (mirror frame) in a CNC machine. The basic picture was opened in Adobe Photoshop CC and masked, so a black background was achieved, then the "Grayscale" filter was applied. The picture was then uploaded to the ArtCAM where the dimensions were determined. The model that was automatically created needed some smoothing. When the optimal texture was achieved, an STL model was created with the "Create Triangle Mesh" operation. The final number of triangles in the STL model was 221,656.

The STL model was later uploaded to SolidCAM, as was the workpiece that was created beforehand in SolidWorks. Both the model and workpiece were aligned and positioned in a coordinate system. With the commands "Add Milling Operation" and "3D HSR" the type of processing was chosen. "HM Roughing" was the first operation whose adequacy was checked. The parameters for the operation were similar if not equal. The chosen "End Mill" had a diameter of 30 mm, maximal milling depth 38 mm and feed 2500 mm/min. The "Boundary-Tool Relation" was set at "External", in the "Passes" section milling was set with an offset of 2 mm and tolerance of 0.4 mm. The milling depth was 17 mm and milling type was "Constant". The tool step was selected as 90% the length of the diameter. The upper boundary was at 0 mm and the lower boundary at -34 mm. "Link" was set as "Bi-directional", allowing the tool to mill in both ways. The minimal milling diameter was chosen automatically. Stepdown was set as "Plunge Ramping". The operations "Contour Roughing" and "Hatch Roughing" were also checked, and the former was the optimal one. The HSR group of operations also offers a special "Rest Roughing" operation which was used to roughly remove more excess material.

The HSR operations were followed with HSM operations. A smaller tool was used (a ball nose mill with diameter 12 mm). The first operation tested from the group was "Constant Z Machining". The offset was chosen to be 0.5 mm, because the final product is going to need manual polishing. The step down was 1.5 mm, and the function "Smoothing" was enabled. Minimal step down was set to 0.5 mm,

and the direction of milling was set to "Bi-directional". Step over was set to 1.5 mm. Using similar parameters other operations were tested ("Hybrid Constant Z", "Helical Machining", "Linear Machining", "Radial Machining", "Spiral Machining", "Morphed Machining", "3D Constant Step Over", "3D Corner Offset", "Offset Cutting" and "Parallel Pencil Milling"). Every operation was checked with a "Solid Verify" simulation, where the estimated quality of the final product and time needed for the operation were found.

Some operations were left out, as they are very specific and unsuitable for our model. In the HSR operation group the optimal one turned out to be "Contour Roughing", as it was the fastest, needing just 28 minutes and 22 seconds. The "Rest Roughing" operation needed 28 minutes and 51 seconds. When the HSM operations were evaluated, both the time needed and final quality were taken into consideration. The operations that needed more than 3 hours and 30 minutes to perform were evaluated first, and the rest of them were evaluated by the look of the surface. The optimal one was "3D Constant Step Over". All three chosen operations together ("Contour Roughing", "Rest Roughing" and "3D Constant Step Over") were finished in 4 hours 1 minute and 31 seconds. Finally the G code was generated for our program.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENTS

Raziskava je bila opravljena v okviru diplomskega dela za zaključek Univerzitetnega študija Lesarstva – 1. stopnja. Delo je bilo opravljeno na Katedri za mehanske obdelovalne tehnologije lesa, Oddelka za lesarstvo, Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani.

VIRI

REFERENCES

- ArtCAM. Delcam launches new ArtCAM Pro software for artistic CAD/CAM. Retrieved from http://www.delcam.com.tw/artcam/news/press_article0bd7.html?releaseld=440
- Auslander, L. (1998). *Taste and Power: Furnishing Modern France*: University of California Press.
- Balič, J., & Pahole, I. (2008). *Proizvodne tehnologije*. Maribor: Fakulteta za strojništvo.

- Béchet, E., Cuilliere, J. C., & Trochu, F. (2002). Generation of a finite element MESH from stereolithography (STL) files. *CAD Computer Aided Design*, 34(1), 1-17. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(00\)00146-9](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(00)00146-9)
- Jovanović, J., Smajić, S., & Beljo Lučić, R. (2020). Influence of different machining on the surface roughness of beech wood samples. Paper presented at the Sustainability of Forest-Based Industries in the Global Economy - Proceedings of Scientific Papers.
- Koleda, P., Barcák, Š., Svoreň, J., Naščák, L., & Dobřík, A. (2019). Influence of cutting wedge treatment on cutting power, machined surface quality, and cutting edge wear when plane milling oak wood. *BioResources*, 14(4), 9271-9286. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.14.4.9271-9286>
- Merhar, M., Bucar, D. G., & Merela, M. (2020). Machinability Research of the Most Common Invasive Tree Species in Slovenia. *Forests*, 11(7).
- Merhar, M., Šega, B., & Gornik, B. D. (2019). The influence of thermal modification on the machining properties of beech wood. *Les/Wood*, 68, 15-24. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2019.v68n01a02>
- Rypl, D., & Bittnar, Z. (2006). Generation of computational surface meshes of STL models. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 192(1), 148-151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2005.04.054>
- SolidCAM (2015). *SolidCAM 2015 HSR/HSM Module User Guide: SolidCAM*.