

45. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

45th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA

PROCEEDINGS



INOVACIONI CENTAR MAŠINSKOG FAKULTETA U BEOGRADU
UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

THE INNOVATION CENTER OF THE FACULTY OF MECHANICAL
ENGINEERING IN BELGRADE
UNIVERSITY OF BELGRADE, FACULTY OF MECHANICAL
ENGINEERING

Beograd, jun 2026.

45. JUPITER KONFERENCIJA

ZBORNİK RADOVA PROCEEDINGS



38. simpozijum
**CIM U STRATEGIJI TEHNOLOŠKOG
RAZVOJA INDUSTRIJE PRERADE METALA**

32. simpozijum
CAD/CAM

41. simpozijum
NU – ROBOTI – FTS

47. simpozijum
**UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM U
INDUSTRIJI PRERADE METALA**

25. simpozijum
MENADŽMENT KVALITETOM

Organizator:

**INOVACIONI CENTAR MAŠINSKOG FAKULTETA U BEOGRADU
UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET**

Beograd, jun 2026. godine

45. JUPITER KONFERENCIJA

ZBORNİK RADOVA

Organizator i izdavač:

**INOVACIONI CENTAR MAŠINSKOG FAKULTETA U BEOGRADU
UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET**

Adresa:

Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija

Tel: 011/3370341, Fax: 011/3370364

El. pošta: jupiter@mas.bg.ac.rs

Za izdavača: Dekan, dr Vladimir Popović, red. prof.

Urednik: dr Nebojša Manić, red. prof., Predsednik komisije za izdavačku delatnost Mašinskog fakulteta u Beogradu

Štampanje odobrila:

Komisija za izdavačku delatnost Mašinskog fakulteta i Dekan Mašinskog fakulteta

Odlukom br. 11/2026 od 26.05.2026.

Tehnički urednici:

Prof. dr Saša Živanović

Prof. dr Miloš Pjević

Doc. dr Dušan Nedeljković

Lazar Matijašević, mast. inž. maš.

Beograd, jun 2026.

ISBN 978-86-6060-250-5

Izaberite simpozijum JUPITER Konferencije

**CIM U STRATEGIJI TEHNOLOŠKOG RAZVOJA
INDUSTRIJE PRERADE METALA**
CIM IN THE STRATEGY OF TECHNOLOGICAL
DEVELOPMENT OF METALWORKING INDUSTRY

CAD/CAM

NU – ROBOTI – FTS
NC – ROBOTS – FMS

**UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM U INDUSTRIJI
PRERADE METALA**
PRODUCTION CONTROL IN METALWORKING INDUSTRY

MENADŽMENT KVALITETOM
QUALITY

Spisak svih radova na JUPITER Konferenciji
po prezimenu prvog autora

Borojević, S., Sredanović, B., Čiča, Đ., Gajanin, M., Marković, J., Vujasin, D. IZVOD IZ ISTRAŽIVANJA U OBLASTI PROJEKTOVANJA TEHNOLOŠKIH PROCESA, SAVREMENIH METODA OBRADE I MAŠINA ALATKI	UR.38
Bošković, J., Ivković, M., Pantić, M., Grujić, I., Živković, B., Petrović Savić, S., Erić, M. MODELIRANJE I KINEMATSKA ANALIZA PETOOSNE GLODALICE	3.18
Božić, D., Milošević, M., Santoši, Ž., Lukić, D. HIBRIDNI „GREY-BOX” MODEL ZA OPTIMIZACIJU: INTEGRACIJA GRUPNE TEHNOLOGIJE I RANDOM FOREST REGRESIJE	1.12
Budimir, A. B., Tabaković, S., Zeljković, M. CALIBRATION OF A SPECIALIZED LATHE FOR MACHINING WHEELSET ASSEMBLIES OF RAIL TRACTION AND TOWED VEHICLES	3.25
Crnobrnja Maletić, J., Vasilić, G., Nešovanović, Lj., Živanović, S. GENERISANJE PUTANJA ZA OBRADU KONTURA PARAMETARSKIM PROGRAMIRANJEM PODRŽANO VIRTUELONOM OBRADOM	3.41
Četnik, U., Matijašević, L., Jakovljević, Ž. REGISTRACIJA TRODIMENZIONALNIH OBLAKA TAČAKA SA RAVNIM SEGMENTIMA	3.31
Devedžić, G. WAITING FOR THE FOUNDATION (WORLD) MODEL FOR CAx TECHNOLOGIES	UR.29
Dragičević, A., Popović, M., Pjević, M., Mladenović, G. IZRADA METALNIH DELOVA PRIMENOM ADITIVNE TEHNOLOGIJE EKSTRUDIRANJEM MATERIJALA	2.21
Dragičević, A., Pjević, M., Popović, M., Mladenović, G. EKSPERIMENTALNA IDENTIFIKACIJA MEHANIČKIH KARAKTERISTIKA POLIMERNIH DELOVA DOBIJENIH FFF METODOM ADITIVNE PROIZVODNJE	2.27
Dučić, N., Baralić, J., Milićević, I., Savićević, P. UPOREDNA ANALIZA G KODOVA GENERISANIH U CAD/CAM SOFTVERSKIM SISTEMIMA FUSION 360 I ZW3D	3.47
Đurović, S., Velikinac, N., Mišić, M., Ivković, M., Lazarević, D., Gvozdić, A. 3D PRINTING IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY: TECHNOLOGIES, APPLICATIONS, AND FUTURE PERSPECTIVES	2.15
Erwinski, K., Ustaszewski, P., Živanović, S., Slavkovic, N., Dimic, Z. VIABILITY OF USING RASPBERRY PI FOR HIGH-PERFORMANCE REAL TIME NUMERICAL CONTROL OVER ETHERCAT FIELDBUS	3.1
Галин, И. Ю., Судов, Е. В., Бојановић, М., Мандић, А. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ: НАДЕЖНОСТЬ В РАМКАХ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ	1.1
Plić, A., Stojčić, V., Dimitrijević, M., Živanović, U., Pisković, M., Mandić, V., Delić, M. ISPITIVANJE MOGUĆNOSTI ZAMENE METALNIH ALATA FDM-ŠTAMPANIM ABS ALATIMA PRI U-SAVIJANJU LIMOVA	2.35
Ivanović, M., Radičević, B., Grković, V., Petrović, A. METODOLOGIJA PROJEKTOVANJA MODULARNIH REKONFIGURABILNIH MAŠINA ALATKI	3.53
Ivanović, M., Otović, M., Ivanov, T., Peković, O. PRIMENA I TEHNOLOGIJA IZRADE KOMPONENATA BAZIRANIH NA TROSTRUKO PERIODIČNIM MINIMALNIM POVRŠINAMA (TPMS)	2.43
Ivković, M., Bošković, J., Stojanović, N., Đorđević, A., Đurić, S., Petrović Savić, S., Devedžić, G. NUMERIČKA SIMULACIJA PROCESA BUŠENJA SA REALNOM GEOMETRIJOM ALATA	3.59

45. JUPITER KONFERENCIJA
sa međunarodnim učešćem

45th JUPITER CONFERENCE
with foreign participants

ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS



41. simpozijum

NU * ROBOTI * FTS

Beograd, jun 2026.

NU – ROBOTI –FTS
NC - ROBOTS – FMS

Sesija 1

Erwinski, K., Ustaszewski, P., Živanović, S., Slavkovic, N., Dimic, Z. VIABILITY OF USING RASPBERRY PI FOR HIGH-PERFORMANCE REAL TIME NUMERICAL CONTROL OVER ETHERCAT FIELDBUS	3.1
Живановић, С., Воркапић, Н., Славковић, Н., Димић, З. ПРОГРАМИРАЊЕ И СИМУЛАЦИЈА СТОНЕ ТРООСНЕ МАШИНЕ АЛАТКЕ СА ДВЕ ТРАНСЛАТОРНЕ И ВЕРТИКАЛНОМ ОБРТНОМ ОСОМ.....	3.9
Bošković, J., Ivković, M., Pantić, M., Grujić, I., Živković, B., Petrović Savić, S., Erić, M. MODELIRANJE I KINEMATSKA ANALIZA PETOOSNE GLODALICE	3.18
Budimir, A. B., Tabaković, S., Zeljković, M. CALIBRATION OF A SPECIALIZED LATHE FOR MACHINING WHEELSET ASSEMBLIES OF RAIL TRACTION AND TOWED VEHICLES	3.25
Četnik, U., Matijašević, L., Jakovljević, Ž. REGISTRACIJA TRODIMENZIONALNIH OBLAKA TAČAKA SA RAVNIM SEGMENTIMA	3.31
Crnobrnja Maletić, J., Vasilić, G., Nešovanović, Lj., Živanović, S. GENERISANJE PUTANJA ZA OBRADU KONTURA PARAMETARSKIM PROGRAMIRANJEM PODRŽANO VIRTUELONOM OBRADOM.....	3.41
Dučić, N., Baralić, J., Milićević, I., Savićević, P. UPOREDNA ANALIZA G KODOVA GENERISANIH U CAD/CAM SOFTVERSKIM SISTEMIMA FUSION 360 I ZW3D	3.47
Ivanović, M., Radičević, B., Grković, V., Petrović, A. METODOLOGIJA PROJEKTOVANJA MODULARNIH REKONFIGURABILNIH MAŠINA ALATKI	3.53
Ivković, M., Bošković, J., Stojanović, N., Dorđević, A., Đurić, S., Petrović Savić, S., Devedžić, G. NUMERIČKA SIMULACIJA PROCESA BUŠENJA SA REALNOM GEOMETRIJOM ALATA	3.59





Ivković, M., Bošković, J., Stojanović, N., Đorđević, A., Đurić, S., Petrović Savić, S., Devedžić, G.¹⁾

NUMERIČKA SIMULACIJA PROCESA BUŠENJA SA REALNOM GEOMETRIJOM ALATA²⁾

Rezime

Proces bušenja predstavlja jednu od najčešće primenjivanih operacija obrade rezanjem, pri čemu geometrija alata značajno utiče na formiranje strugotine i stabilnost procesa. U radu je prikazana numerička analiza procesa bušenja zasnovana na realnoj geometriji alata dobijenoj 3D skeniranjem burgije od tvrdog metala korišćenjem Artec Spider 3D skenera. Dobijeni model je obrađen u softverima Geomagic Design X i CATIA V5 R21 sa ciljem uklanjanja geometrijskih nepravilnosti i pripreme modela za simulaciju. Numerička simulacija procesa bušenja izvedena je u softverskom paketu DEFORM-3D. Analizirani su proces formiranja strugotine, raspodela napona i temperaturno polje u zoni rezanja, kao i obrtni moment tokom procesa bušenja. Rezultati simulacije omogućavaju detaljniji uvid u mehanizam rezanja i uticaj geometrije alata na tok procesa, čime se stvaraju osnove za pouzdaniju analizu i optimizaciju parametara obrade.

Ključne reči: bušenje, 3D skeniranje, numerička simulacija, geometrija alata, DEFORM-3D, formiranje strugotine

1. UVOD

Razvoj savremenih digitalnih tehnologija u oblasti proizvodnog inženjerstva značajno je promenio pristup analizi i optimizaciji procesa obrade rezanjem. Uvođenje numeričkih metoda, pre svega zasnovanih na metodi konačnih elemenata (*engl. Finite Element Methods - FEM*), omogućilo je detaljno razumevanje kompleksnih termomehaničkih fenomena koji se javljaju tokom obrade, a koji su često nedostupni direktnim eksperimentalnim metodama. Numeričko modeliranje danas predstavlja značajan alat za analizu procesa obrade, jer omogućava precizno određivanje stanja naprezanja, deformacija, temperature i interakcije alat–materijal u realnim uslovima obrade [1,2].

Savremeni softverski paketi omogućavaju simulaciju različitih procesa obrade, uključujući struganje, glodanje i bušenje, pri čemu se proces može analizirati u potpunosti u digitalnom okruženju. Njihova primena omogućava inženjerima da predvide ponašanje sistema pre izvođenja realnih eksperimenata, čime se značajno smanjuju troškovi razvoja i optimizacije tehnoloških procesa. Posebno je značajno to što numeričke simulacije omogućavaju uvid u pojave koje su fizički teško merljive, kao što su raspodela temperature i naprezanja u zoni rezanja, kao i mehanizam formiranja strugotine [1-4].

U okviru obrade rezanjem, proces bušenja predstavlja izazovno polje istraživanja zbog svoje kompleksnosti i specifičnih uslova rada. Karakteriše ga poluzatvoren prostor rezanja, otežano odvođenje strugotine i izraženi termomehanički efekti, koji direktno utiču na stabilnost procesa i trajnost alata. Jedan od ključnih problema u analizi bušenja jeste činjenica da je zona formiranja strugotine skrivena, što značajno otežava eksperimentalno ispitivanje i razumevanje procesa [5,6].

¹⁾ Milan Ivković, istraživač saradnik (milan.ivkovic@kg.ac.rs), Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu; Julija Bošković, istraživač (julijabkg@gmail.com), Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu; dr Nadica Stojanović, doc. (nadica.stojanovic@kg.ac.rs), Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu; dr Aleksandar Đorđević, vanr. prof. (adjordjevic@kg.ac.rs), Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu; Zastava TERVO d.o.o; Stefan Đurić, istraživač (sdjuricrs@gmail.com), Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu; dr Suzana Petrović Savić, vanr. prof. (petrovic.savic@kg.ac.rs), Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu; dr Goran Devedžić, red. prof. (devedzic@kg.ac.rs), Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu.

²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja su realizovana u okviru projekata koje finansijski podržava Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Vlade Republike Srbije po evidencionom broju Ugovora 451-03-34/2026-03/200107 od 05.02.2026.god.

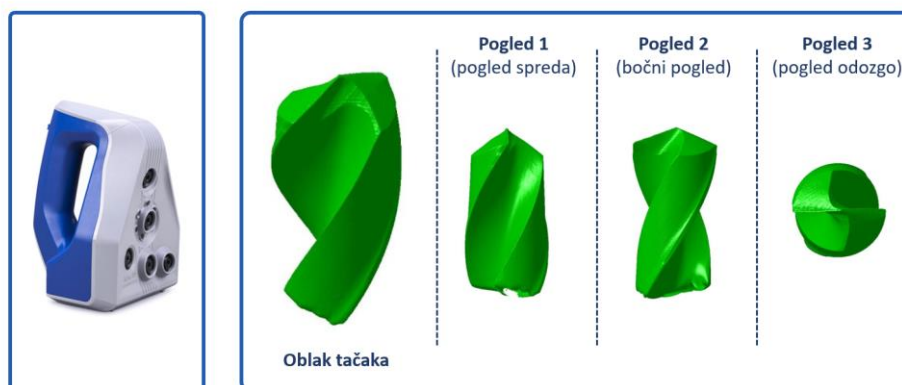
Temperatura u zoni rezanja predstavlja jedan od ključnih parametara procesa obrade, jer direktno utiče na degradaciju alata, promenu mehaničkih svojstava materijala i stabilnost procesa. Usled intenzivnog trenja i plastične deformacije generiše se velika količina toplote, dok složena geometrija spiralne burgije dodatno utiče na raspodelu opterećenja i uslove obrade, koji se menjaju od periferije ka centru alata. Na obodu burgije ostvaruje se najveća brzina rezanja, dok u centralnoj zoni dominiraju plastična deformacija i intenzivno trenje [6]. Zbog takve raspodele kinematskih i termomehaničkih uslova, oblast u blizini jezgra alata predstavlja kritičnu zonu opterećenja, u kojoj dolazi do koncentracije naprezanja, povećanog generisanja toplote i otežanog odvođenja strugotine, što neposredno utiče na stabilnost procesa i razvoj habanja alata. Pored toga, geometrijski parametri alata značajno utiču na tok strugotine i nivo opterećenja, pri čemu neadekvatna geometrija može izazvati povećanje sila rezanja, temperature i ubrzano oštećenje alata.

Savremena istraživanja pokazuju da raspodela naprezanja, temperature i sila rezanja u velikoj meri zavisi od realne geometrije alata i uslova kontakta u zoni obrade, zbog čega precizno modeliranje burgije predstavlja osnovu za pouzdanu analizu procesa i identifikaciju kritičnih zona opterećenja. Primena digitalnih tehnologija (npr. 3D skeniranja) omogućava rekonstrukciju stvarne geometrije alata i formiranje realističnijih numeričkih modela, čime se povećava tačnost simulacija [7].

U ovom radu razmatra se primena savremenih digitalnih alata u analizi procesa bušenja, sa posebnim fokusom na korišćenje realne geometrije alata dobijene 3D skeniranjem i numeričku simulaciju procesa u DEFORM-3D okruženju. Cilj rada je da se kroz integrisani digitalni pristup omogući dublje razumevanje mehanizma rezanja i uticaja geometrije alata na ponašanje procesa, kao i da se obezbedi osnova za pouzdanu optimizaciju tehnoloških parametara.

2. MATERIJALI I METODE

Geometrija alata definisana je na osnovu 3D digitalizacije realne spiralne burgije prečnika $\varnothing 10$ mm izrađene od tvrdog metala (WC). Proces skeniranja izvršen je pomoću uređaja Artec Spider (Sl. 1). Nakon skeniranja, u softveru Geomagic Design X (<https://hexagon.com>) izvršena je rekonstrukcija geometrije modela, pri čemu su sprovedeni filtriranje podataka, uklanjanje lokalnih nepravilnosti i korekcija diskontinuiteta, kao i formiranje kontinuirane površine usled prisustva šuma i neuniformne raspodele tačaka. Posebna pažnja posvećena je zoni vrha burgije zbog njenog značajnog uticaja na proces rezanja i formiranje strugotine.



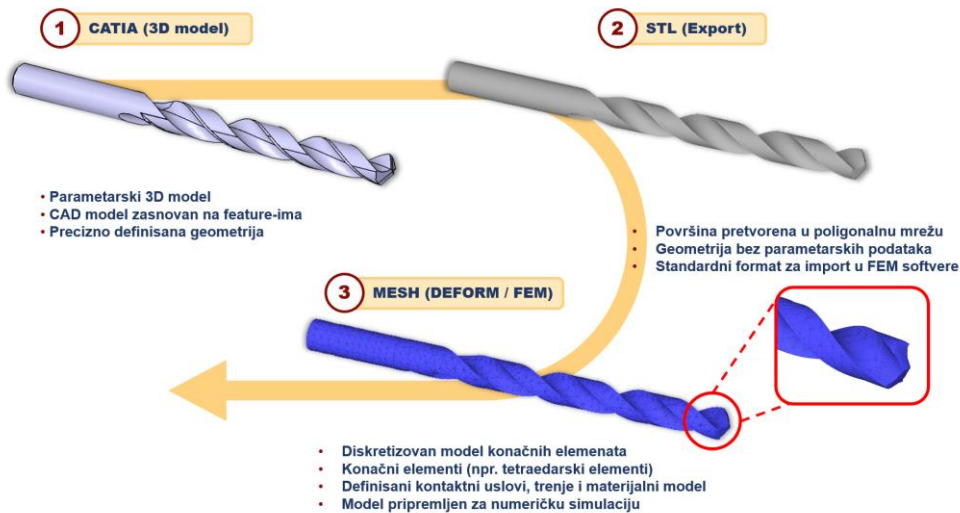
Slika 1. Vrh burgije dobijen iz 3D skeniranjem

Rekonstruisana geometrija alata je zatim uvezena u softver CATIA V5 R21 (<https://www.3ds.com>), sa ciljem modeliranja preostalog dela alata, nakon čega je generisan STL model zatvorene i kontinualne površine pogodan za numeričku simulaciju. Numerička simulacija procesa bušenja sprovedena je u softverskom paketu DEFORM-3D (<https://www.deform.com/>), zasnovanom na metodi konačnih elemenata sa trodimenzionalnom Lagrange-ovom formulacijom.

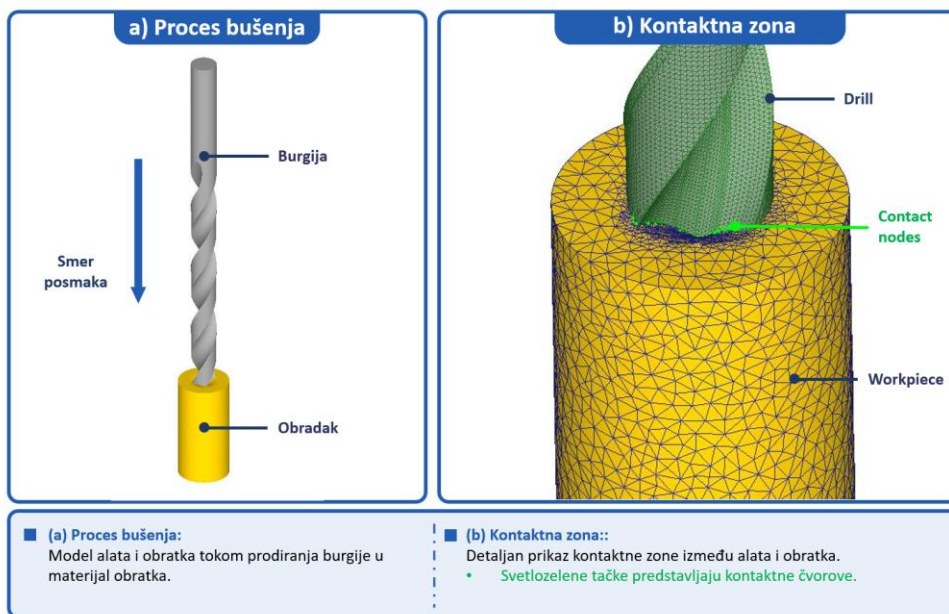
Proces bušenja definisan je kombinacijom rotacionog kretanja alata oko sopstvene ose i translacionog kretanja u aksijalnom pravcu. Alat je modeliran kao kruto telo, pri čemu model habanja alata nije uključen, niti su razmatrani efekti hlađenja. Obradak je definisan kao deformabilan materijal. Kao materijal obratka korišćen je čelik AISI 1045, čije je ponašanje opisano Johnson–Cook konstitutivnim modelom, koji uzima u obzir uticaj deformacije, brzine deformacije i temperature. Geometrija obratka definisana je kao cilindrično telo prečnika 20 mm i visine 40 mm, dok je dubina bušenja u simulaciji iznosila 20 mm. Obradak je potpuno

fiksiran, dok je alatu dodeljeno rotaciono kretanje sa brzinom od 600 o/min i posmak od 0.25 mm/o, što odgovara brzini rezanja od 838.33 m/min.

Diskretizacija modela izvršena je primenom tetraedarskih konačnih elemenata. Mreža je dodatno usitnjena u zoni kontakta između alata i obratka, gde se očekuju najveći gradijenti napona, deformacije i temperature. Ukupan broj elemenata iznosio je približno 8914 za alat i 42706 za obradak (Sl.2). Tokom simulacije primenjeno je adaptivno remrežavanje (*engl. Remeshing*), koje omogućava očuvanje kvaliteta mreže usled velikih plastičnih deformacija i kontinuiranog uklanjanja materijala tokom formiranja strugotine. Gustina mreže odabrana je kao kompromis između računске efikasnosti i tačnosti rešenja.



Slika 2. Mreža konačnih elemenata sa lokalnim usitnjavanjem u zoni rezanja



Slika 3. Model interakcije alata i obratka u DEFORM-3D okruženju

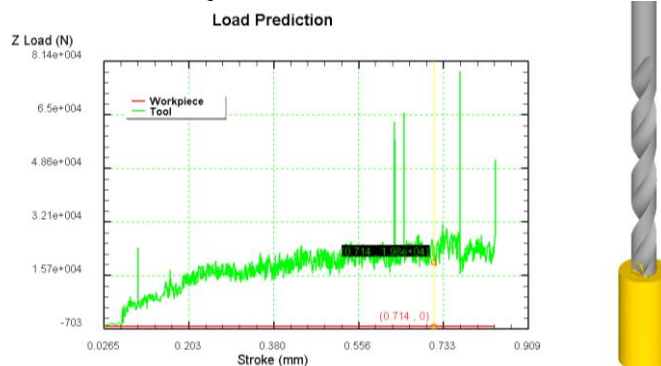
Kontakt između alata i obratka modeliran je primenom smičnog modela trenja sa faktorom trenja $\mu = 0.6$. Ova vrednost nalazi se u opsegu vrednosti koje se koriste u literaturi za simulacije obrade metala, pri čemu trenje značajno utiče na raspodelu temperature, formiranje strugotine i sile rezanja. Razmena toplote na kontaktnoj površini definisana je koeficijentom prenosa toplote od 45 N/s/mm²/°C, dok je početna temperatura obratka postavljena na 20 °C.

Numerička analiza sprovedena je kao vremenski zavisna (*engl. transient*) simulacija kroz 2000 vremenskih koraka, pri čemu su rezultati snimani u definisanim intervalima. U okviru simulacije analizirani su proces formiranja strugotine, raspodela naprezanja u zoni rezanja, temperaturno polje i moment bušenja.

3. REZULTATI

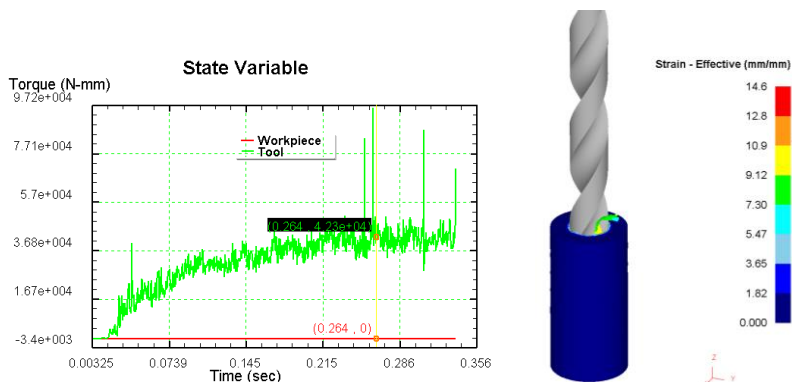
U okviru numeričke simulacije procesa bušenja analizirani su razvoj momenta bušenja, promena snage tokom procesa, raspodela efektivne deformacije i mehanizam formiranja strugotine. Rezultati su prikazani kroz vremensku evoluciju karakterističnih procesnih parametara, kao i kroz prostornu raspodelu relevantnih polja u zoni rezanja. Posebna pažnja posvećena je analizi ponašanja materijala u kontaktnoj zoni alat–obradak, uslovima nastanka i razvoja strugotine, kao i promenama opterećenja tokom procesa bušenja.

Na slici 4 prikazana je promena aksijalnog opterećenja alata u funkciji hoda tokom procesa bušenja. Uočava se postepeni porast sile sa povećanjem dubine prodiranja alata u materijal, pri čemu se nakon početne faze ostvaruje relativno stabilan tok opterećenja. Srednje vrednosti aksijalne sile tokom dominantnog dela procesa kreću se u opsegu od približno 1.5×10^4 N do 2.0×10^4 N. Takođe, registrovane su lokalne oscilacije opterećenja, pri čemu maksimalna vrednost sile dostiže približno 8.0×10^4 N.



Slika 4. Zavisnost aksijalne sile od hoda alata tokom procesa bušenja

Na slici 5 prikazana je promena obrtnog momenta tokom procesa bušenja, zajedno sa raspodelom efektivne deformacije u zoni rezanja. Dijagram pokazuje postepeni porast obrtnog momenta sa napredovanjem procesa, nakon čega dolazi do stabilizacije njegovih vrednosti. U dominantnom delu procesa vrednosti momenta kreću se približno oko 3.0×10^4 Nmm, uz prisutne oscilacije usled promenljivih uslova kontakta između alata i obratka. Najveće vrednosti deformacije javljaju se u neposrednoj zoni kontakta reznih ivica alata i materijala obratka, odnosno u području formiranja strugotine i maksimalna vrednost iznosi približno 14.6 mm/mm.



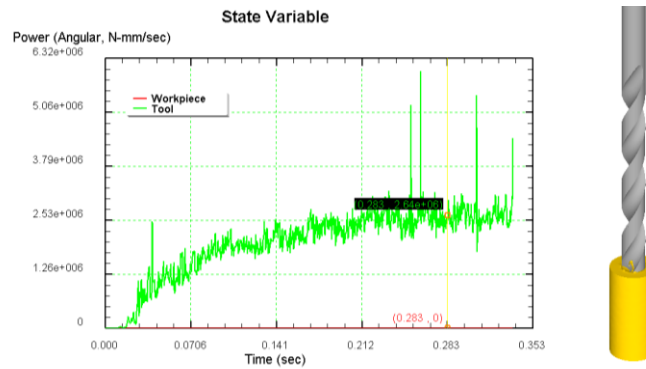
Slika 5. Promena obrtnog momenta i raspodela efektivne deformacije tokom procesa bušenja

U toku procesa bušenja dolazi do postepenog povećanja snage usled rasta otpora materijala i intenzivnijeg kontakta između alata i obratka (Sl. 6). Nakon početne faze uspostavlja se relativno stabilan režim rada, pri čemu se dominantne vrednosti snage kreću približno od 2.0×10^6 Nmm/s do 2.6×10^6 Nmm/s. Tokom procesa obrade prisutne su i oscilacije snage čije maksimalne vrednosti dostižu približno 5.5×10^6 Nmm/s u završnim fazama prodiranja alata u obradak.

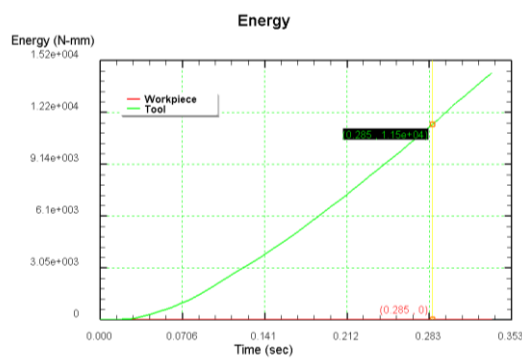
Tokom procesa rezanja registrovan je kontinualan porast ukupne energije potrebne za deformaciju i uklanjanje materijala obratka (Sl.7). U početnoj fazi porast energije je sporiji, dok sa povećanjem dubine prodiranja alata dolazi do izraženijeg povećanja vrednosti. Na kraju analiziranog intervala ukupna energija dostiže približno 1.5×10^4 Nmm.

Najveće vrednosti efektivnog napona javljaju se u neposrednoj zoni kontakta između reznih ivica alata i materijala obratka, odnosno u području formiranja strugotine (Sl. 8). Maksimalna vrednost efektivnog napona iznosi približno 1.46×10^3 MPa, što ukazuje na intenzivno lokalno naponsko stanje i izraženu plastičnu deformaciju materijala u zoni rezanja. Sa udaljavanjem od kontaktne zone dolazi do smanjenja vrednosti

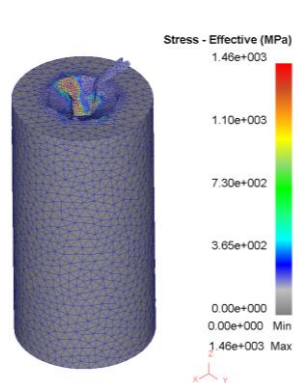
napona unutar obratka.



Slika 6. Promena snage u funkciji vremena

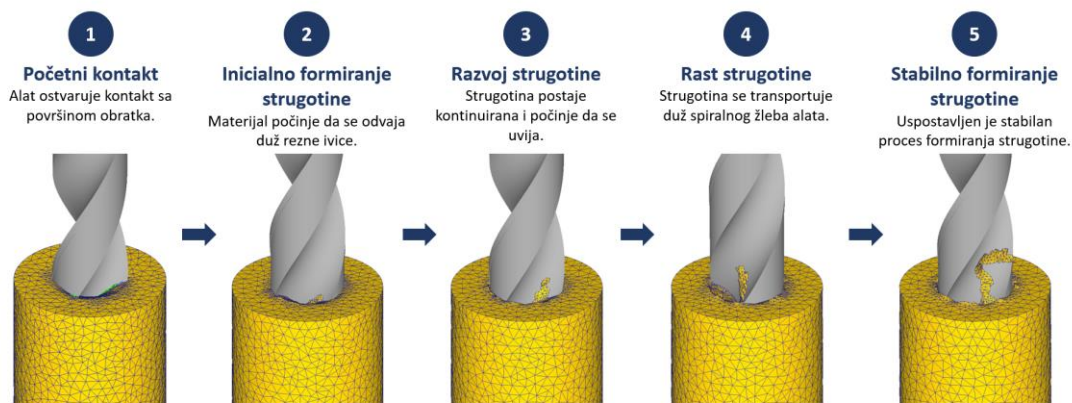


Slika 7. Promena energije u funkciji vremena



Slika 8. Raspodela efektivnog napona u zoni rezanja tokom procesa bušenja

Na slici 9 prikazan je sekvencijalni razvoj procesa formiranja strugotine tokom numeričke simulacije procesa bušenja. U početnoj fazi ostvaruje se kontakt između vrha alata i površine obratka, pri čemu dolazi do inicijalne deformacije materijala. Daljim prodiranjem alata započinje odvajanje materijala duž reznih ivica, čime nastaje početna strugotina.



Slika 9. Faze formiranja i razvoja strugotine tokom procesa bušenja

U narednim fazama dolazi do kontinualnog razvoja strugotine i njenog uvijanja usled rotacionog kretanja alata i geometrije spiralnih kanala burgije. Sa povećanjem dubine prodiranja ostvaruje se transport strugotine duž spiralnih žlebova alata, nakon čega se uspostavlja stabilan režim rezanja sa kontinualnim formiranjem i odvođenjem strugotine iz zone obrade. Prikazani rezultati potvrđuju sposobnost numeričkog modela da reprodukuje karakteristične mehanizme deformacije materijala i formiranja strugotine tokom procesa bušenja

4. DISKUSIJA

Dobijeni rezultati numeričke simulacije pokazali su nelinearnost procesa bušenja, što je posledica složene interakcije između geometrije alata, uslova kontakta i mehaničkog ponašanja materijala obratka. Analizom razvoja momenta, snage, energije i raspodele deformacija uočeno je da se karakteristične promene procesnih veličina mogu direktno povezati sa pojedinim fazama prodiranja alata u materijal.

U početnoj fazi procesa registrovan je nagli porast momenta i snage, što se može povezati sa uticajem poprečnog sečiva. U ovoj zoni brzina rezanja je minimalna, zbog čega dominiraju sabijanje i plastična deformacija materijala, umesto čistog procesa rezanja. Slična zapažanja navode Galal et al, koji ističu da geometrija vrha alata ima dominantan uticaj na razvoj aksijalnog opterećenja i stabilnost procesa bušenja [5]. Takođe, Pervaiz et al. pokazali su da u početnim fazama procesa dolazi do intenzivne koncentracije naprezanja i povećanja otpora rezanja usled ograničenog prostora za formiranje i evakuaciju strugotine [6].

Sa povećanjem dubine prodiranja alata dolazi do povećanja reznih opterećenja i procesnih parametara, što se može povezati sa većim zahvatom materijala i intenzivnijim kontaktom između alata i obratka. Nakon početne tranzijentne faze uspostavlja se relativno stabilan režim obrade, uz prisutne oscilacije momenta i snage. Slični trendovi registrovani su u istraživanjima Deepanraj et al. i Mathivanan et al., gde su DEFORM-3D simulacije pokazale početni nagli porast opterećenja, nakon čega dolazi do stabilizacije procesa uz fluktuacije procesnih veličina karakteristične za procese obrade rezanjem [1,2].

Raspodela efektivne deformacije pokazala je da se najveće vrednosti javljaju u neposrednoj zoni rezanja i formiranja strugotine. Lokalizacija deformacija u uskoj oblasti ispred rezne ivice ukazuje da je odvajanje materijala dominantno posledica intenzivne smicajne deformacije. Povišene vrednosti deformacije registrovane su i u oblasti poprečne rezne ivice, što ukazuje na njeno značajno učešće u deformisanju i potiskivanju materijala tokom procesa bušenja [8]. Dobijeni rezultati saglasni su sa analizama Sherov et al., u kojima je pokazano da se deformacije dominantno razvijaju u kontaktnoj zoni alat–obradak i šire u oblasti odvajanja materijala, pri čemu raspodela deformacija zavisi od geometrije alata i uslova obrade [4].

Vizuelizacija razvoja strugotine pokazala je kontinualan karakter njenog formiranja i odvođenja duž spiralnih kanala burgije. Istovremeno, registrovane su lokalne nestabilnosti u tóku strugotine, koje se mogu povezati sa promenama kontakta između strugotine i površine alata. Ovakve pojave direktno utiču na oscilacije momenta i snage tokom procesa obrade. Slične zaključke iznose i prethodna istraživanja numeričkog modeliranja bušenja, gde se navodi da stabilnost odvođenja strugotine predstavlja jedan od ključnih faktora stabilnosti procesa rezanja [5,6].

Poseban doprinos ovog istraživanja predstavlja primena realne geometrije alata dobijene postupkom 3D skeniranja i rekonstrukcije modela. Za razliku od idealizovanih geometrijskih modela, ovakav pristup omogućava realističnije modeliranje kontaktnih uslova u zoni rezanja, posebno u oblasti vrha burgije i prelaza ka glavnim reznim ivicama. Betts et al. naglašavaju da primena rekonstruisane geometrije alata omogućava precizniju analizu lokalnih fenomena habanja i opterećenja [7].

Osnovna ograničenja sprovedenog istraživanja proizlaze iz pojednostavljenja numeričkog modela. Alat je modeliran kao kruto telo, pa elastične deformacije alata tokom procesa obrade nisu razmatrane, dok odsustvo modela habanja ne omogućava analizu promene geometrije reznih ivica i ponašanja alata pri dužem vremenu obrade. Simulacijom nisu obuhvaćeni ni efekti hlađenja i temperaturno-mehaničke interakcije, što može uticati na raspodelu naprezanja, deformacija i temperature u zoni rezanja. Ipak, dobijeni rezultati kvalitativno su saglasni sa istraživanjima iz oblasti numeričkog modeliranja procesa obrade rezanjem u DEFORM-3D okruženju, budući da su korišćeni modeli materijala, kontakti uslovi i procesni parametri zasnovani na prethodno verifikovanim istraživanjima [9,10].

5. ZAKLJUČAK

Sprovedeno istraživanje pokazalo je da numerička simulacija procesa bušenja u DEFORM-3D okruženju omogućava detaljnu analizu ponašanja materijala i razvoja procesnih opterećenja u zoni rezanja. Primena realne geometrije alata dobijene postupkom 3D skeniranja doprinela je realističnijem prikazu kontaktnih uslova između alata i obratka, čime je omogućena pouzdanija analiza deformacija, raspodele opterećenja i formiranja strugotine tokom procesa bušenja. Dobijeni rezultati ukazuju na značajan uticaj geometrije vrha burgije i uslova kontakta na stabilnost procesa i razvoj karakterističnih procesnih parametara. Iako razvijeni model uključuje određena pojednostavljenja, rezultati su kvalitativno saglasni sa dostupnim istraživanjima iz oblasti numeričkog modeliranja procesa obrade rezanjem i potvrđuju mogućnost primene ovakvog pristupa u analizi i optimizaciji procesa bušenja.

Dalja istraživanja su usmerena ka unapređenju numeričkog modela uključivanjem modela habanja alata, termo-mehaničkih efekata i uslova hlađenja, kao i sprovođenju eksperimentalne validacije dobijenih rezultata. Pored toga, buduća istraživanja obuhvataju i analizu uticaja različitih režima obrade, geometrije burgije i materijala obratka na stabilnost procesa, formiranje strugotine i razvoj procesnih opterećenja.

5. ZAHVALNOST

Ovaj rad je realizovan uz podršku kompanije ZASTAVA TERVO d.o.o. i finansijski podržala objavljivanje rezultata istraživanja, kojoj autori izražavaju posebnu zahvalnost.

6. LITERATURA

- [1] Deepanraj B., Senthilkumar N., Hariharan G., Tamizharasan T., Bezabih T.T.: *Numerical Modelling, Simulation, and Analysis of the End-Milling Process Using DEFORM-3D with Experimental Validation*, Advances in Materials Science and Engineering, Vol 2022, 2022, pp. 5692298.
- [2] Mathivanan A., Swaminathan G., Sivaprakasam P., Suthan R., Jayaseelan V., Nagaraj M.: *DEFORM 3D Simulations and Taguchi Analysis in Dry Turning of 35CND16 Steel*, Advances in Materials Science and Engineering, Vol 2022, 2022, pp. 7765343.
- [3] Okokpujie I.P., Akujieze C.T., Sinebe J.E., Tartibu L.K., Adeoye A., Kelech S.E., Akinlabi E.T.: *Experimental Study and Finite Element Analysis of Temperature Reduction and Distribution During Machining of Al-Si-Mg Composite Using Deform 3D*, Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, Vol 97, No 2, 2022, pp. 8-25.
- [4] Sherov K., Tussupova S., Kuzminova N., Makhmudov L., Mardonov B., Ainabekova S., Abdugaliyeva G., Kokayeva G., Mendaliev S., Kardassinov S.: *A Simulation of the Process of High Speed Milling of Titanium Alloy VT-1-0 in DEFORM-3D*, Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol 15, No 5, 2025, pp. 26703-26710.
- [5] Galal A.M., Elsherbiny A.A., AbouEleaz M.A.: *A Study of Drilling Parameter Optimization of Functionally Graded Material Steel–Aluminum Alloy Using 3D Finite Element Analysis*, Journal of Manufacturing and Material Processing, Vol 8, No 4, 2024, pp. 155.
- [6] Pervaiz S., Kannan S., Subramaniam A.: *Optimization of Cutting Process Parameters in Inclined Drilling of Inconel 718 Using Finite Element Method and Taguchi Analysis*, Materials, Vol 13, No 18, 2020, pp. 3995.
- [7] Betts J., Sadrafshari S., Mohammadi A., Shokrani A.: *On machine 3D reconstruction of endmill tool wear*, Procedia CIRP 00, Vol 133, 2025, pp. 340-345.
- [8] Attanasio A., Faini F., Outeiro J.C.: *FEM simulation of tool wear in drilling*, Procedia CIRP, Vol 58, 2017, pp. 440-444.

ISBN 978-86-6060-250-5



9 788660 602505