
ANALYSIS OF THERMAL PHENOMENA IN MILLING PROCESS

Andelija Mitrović

Technical College Cacak, Serbia, andjelija.mitrovic@vstss.com

Maja Radović

University of Kragujevac, Faculty of Technical Sciences Cacak, Serbia, maja.radovic@ftn.kg.ac.rs

Abstract: Milling is one of the most conventional machining processes used in the industry. The cutting edge of the mill tooth periodically enters and exits from the contact with the workpiece, which leads to periodic heating and cooling during machining. This process is influenced by many output parameters and one of the most important parameters is the temperature because it affects the tool wear and tool life. Also, during the milling process the cross-section of the chip is variable. Cutting tools are expensive and have a duration that is measured in minutes and therefore, predicting temperature and tool wear during the machining process is of the great importance for the understanding and optimization of process parameters. To determine cutting temperature or temperature fields in end milling different methods can be used. During the last decades various experimental methods were developed for measuring cutting temperature. Measuring temperature with infrared thermal imaging camera is most suitable method concerning capturing values of temperature fields. An experimental approach to studying the cutting process is expensive and time-consuming, especially when a wide range of tool geometry, material, and machining parameters are included. Because of these difficulties, alternative approaches such as mathematical simulations have been developed. Numerical methods are most commonly used in those mathematical simulations. In the research field of cutting process, the finite element method is regarded as a very useful tool to study the cutting process of materials. The aim of this paper is the modeling and simulation of milling predictive temperature in the cutting zone by using the finite element method. The right choice of finite element software is very important in determining the scope and quality of the analysis that will be performed. In order to predict the occurrence of thermal processing milling was used software package Third Wave AdvantEdge. AdvantEdge contains a user-friendly interface and offers the possibility of creating new tool and workpiece geometries within the program and also to import complex geometries from other CAD files. 3D model of the workpiece and end mill was created in the software package SolidWorks. AdvantEdge also allows users to import complex geometries and have extensive material library and allows specifying new materials uses adaptive meshing to increase the accuracy of solution. Workpiece material AISI 4340 steel and tool material Carbide-General were selected from the library of 3D materials. For proper cutting conditions we have presented the results of simulation-based on which the influence of feed per tooth on the temperature in the cutting zone is analyzed.

Keywords: finite element analysis, milling, temperature, Third Wave AdvantEdge

ANALIZA TOPLOTNIH POJAVA PRI OBRADI GLODANJEM**Andelija Mitrović**

Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak, Srbija, andjelija.mitrovic@vstss.com

Maja Radović

Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka Čačak, Serbia, maja.radovic@ftn.kg.ac.rs

Rezime: Obrada glodanjem je jedan od najvažnijih konvencionalnih postupaka rezanja koji se koristi u industriji. Rezna ivica zuba glodala periodično ulazi i izlazi iz kontakta sa obratkom, što dovodi do periodičnog zagrevanja i hlađenja tokom obrade. Zbog ovog naizmjeničnog zagrevanja i hlađenja alata temperatura rezanja je važna performansa koja utiče na habanje alata i kvalitet obrađene površine. Takođe, tokom obrade glodanjem presek strugotine je promenljiv. Rezni alati su skupi i imaju vreme trajanja koje se meri u minutima, pa je predviđanje temperature i habanja alata tokom procesa obrade od velikog značaja za razumevanje i optimizaciju parametara procesa. Za određivanje temperature rezanja ili temperaturskog polja pri čeonom glodanju koriste se različite metode. Za merenje temperature glodanja tokom proteklih decenija razvijen je veliki broj eksperimetalnih metoda. Metoda merenja temperature infracrvenom termovizijskom kamerom je najpogodnija metoda u smislu snimanja vrednosti temperaturnog polja. Eksperimentalni pristup za proučavanje procesa obrade je skup i vremenski dugotrajan, posebno kada je uključen širok opseg geometrije alata, materijala kao i parametara režima obrade. Zbog ovih poteškoća razvijeni su alternativni pristupi kao što su matematičke simulacije u kojima se najčešće koriste numeričke metode. Pokazalo se da je među numeričkim metodama, metoda konačnih elemenata svrsishodnija i u

širokoj upotrebi. Cilj rada je modeliranje i simulacija procesa obrade glodanjem sa predviđanjem temperature u zoni rezanja pomoću metode konačnih elemenata. Pravilan izbor FEM softvera je veoma važan za određivanje obima i kvaliteta analize koji će biti izveden. Za predviđanje toplotnih pojava u obradi glodanjem korišćen je softverski paket Third Wave AdvantEdge. AdvantEdge FEM poseduje user friendly interface i sadrži obimnu biblioteku alata, ali istovremeno daje korisnicima i mogućnost da u okviru programa kreiraju alate se novim geometrijama, kao i mogućnost da uvezu alate iz drugih CAD fajlova. 3D model vretenastog glodala i obratka kreiran je u softverskom paketu SolidWorks. Programski paket AdvantEdge u svojoj biblioteci poseduje 3D modele alata i obratka za simulacije obrade glodanjem (uz mogućnost definisanja odgovarajuće geometrije), ali ne omogućava kreiranje 3D modela alata i obratka. AdvantEdge takođe omogućava korisnicima da uvoze složene geometrije i ima široku biblioteku materijala i omogućava specifikovanje novih materijala pomoću adaptivnih mreža kako bi se povećala tačnost rešenja. Iz biblioteke materijala za obradak izabran je čelik AISI 4340, a za materijal glodala brzorezni čelik. Za odgovarajuće uslove rezanja predstavljeni su rezultati simulacije na osnovu kojih je analizira uticaj koraka po zubu na temperaturu u zoni rezanja.

Ključne reči: metoda konačnih elemenata, glodanje, temperatura, Third Wave AdvantEdge

1. UVOD

Iako je obrada metala rezanjem široko istraživana još od 1900-te godine, izbor parametara režima rezanja, materijala alata i rezne geometrije alata za male obime proizvodnje još uvek je zasnovan na iskustvu operatera ili preporučenim vrednostima. Izabrani parametri obrade su retko optimalni, a mali obim proizvodnje ne opravdava izvođenje eksperimenata za povećanje efikasnosti. Za veće obime proizvodnje, parametri rezanja se dobijaju eksperimentima u cilju ostvarenja maksimalne efikasnosti, a troškove eksperimenta kompenzuje velika količina proizvedenih delova. Treba imati u vidu da su proizvodni eksperimenti skupi i dugotrajani, tako da postoji potreba da se razviju ili efikasnije strategije koje smanjuju broj eksperimenata ili da se eksperimentalna ispitivanja eliminišu u potpunosti.

Obrada glodanjem je jedan od najsloženijih procesa obrade metala rezanjem jer obrada sa glodalom, kao višesećnim alatom, predstavlja složeniju operaciju u odnosu na struganje i bušenje, ne samo zbog većeg broja sečiva, već i zbog promenljivosti preseka strugotine za vreme dok jedan zub vrši obradu. Sam proces obrade prate i mnogi fenomeni, koji utiču na izlazne performanse procesa obrade. Jedan od fenomena je i velika količina toplote koja se oslobađa u zoni rezanja. Temperatura rezanja je indikator toplotnog polja.

Najzastupljeniji tip glodanja je čeonu glodanje sa glavama za glodanje, a zatim glodanje vretenastim glodalima. Proces glodanja vretenastim glodalima je jedan od tipičnih prekidnih procesa. S obzirom na periodičan ulazak i izlazak zuba glodala u zahvat, zubi se zagrevaju dok su u zahvatu i hlade kada izađu iz zahvata. Zbog ovog naizmeničnog zagrevanja i hlađenja alata temperatura rezanja je važna performansa koja utiče na habanje alata i kvalitet obrađene površine.

Za određivanje temperature rezanja ili temperaturnog polja pri čeonu glodanju koriste se različite metode. Glavne teškoće u merenju temperature rezanja javljaju se zato što: alat rotira i zubi alata ulaze i izlaze iz zahvata sa obratkom; zona obuhvaćena toplotom pomera se po površini obratka; strugotina može da ometa merenje i sl.

Za merenje temperature glodanja tokom proteklih decenija razvijen je veliki broj eksperimentalnih metoda. Termoparovi su često korišćeni pri merenju temperature s obzirom da su laki za korišćenje, pokrivaju širok dijapazon temperatura i relativno su jeftini, mada su moguće greške pri njihovoj ugradnji kao i pri interpretaciji očitavanja. Metode zasnovane na zračenju omogućavaju da se merenje temperature izvrši bez kontakta sa objektom merenja. Pokazalo se da je metoda merenja temperature infracrvenom termovizijskom kamerom najpogodnija metoda zasnovana na zračenju, u smislu snimanja vrednosti temperaturnog polja. Visok kvalitet termografske opreme nudi najviše prihvatljiv nivo tačnosti merenja, mada ovaj metod može da bude neprecizan zbog promene koeficijenta emisivnosti, otežanog pristupa uskoj zoni rezanja i mogućnosti da strugotina svojim položajem zakloni oblast čija se temperatura meri.

Eksperimentalni pristup za proučavanje procesa obrade je skup i vremenski dugotrajan, posebno kada je uključen širok opseg geometrije alata, materijala kao i parametara režima obrade. Zbog ovih poteškoća razvijeni su alternativni pristupi kao što su matematičke simulacije u kojima se najčešće koriste numeričke metode. Pokazalo se da je od pomenutih, metoda konačnih elemenata svrsishodnija i u širokoj upotrebi.

Shodno navedenom, metoda konačnih elemenata je u osnovi definisana kao deljenje realnog sistema neprekidne sredine na male elemente, da bi se na kraju, preko opisa svojstva svakog elementa, problem sveo na rešavanje sistema algebarskih jednačina čija rešenja objedinjuju ponašanje ukupnog sistema.

Metoda konačnih elemenata ima veliku primenu u 2D i 3D modeliranju obrade metala rezanjem. Klamecki (1973) je razvio jedan od prvih modela konačnih elemenata za procese obrade metala rezanjem.

Simulacije korišćenjem metode konačnih elemenata imaju centralnu ulogu u razvoju alata i procesa obrade rezanjem, ali izvođenje simulacija nije lako. U poslednjim decenijama modeliranje reznih alata i simulacija procesa obrade postala je popularna i nezamenljiva metoda u istraživanju (Ozel i Zeren, 2007; Kadirgama i dr., 2009; Kovač i dr., 2011 a; Reddy i dr., 2014) i razvoju čak i u industrijskim aplikacijama. Nedavno napravljeni kompleksni softverski programi, koji koriste metodu konačnih elemenata sa novim razvijenim matematičkim modelima, instalirani na super računarima, dali su istraživačima relevantne podatke o svojstvenoj prirodi procesa obrade rezanjem.

U tom kontekstu, analiza procesa metodom konačnih elemenata postaje glavno sredstvo u pogledu modeliranja i simulacije obrade rezanjem. Ona ima važne prednosti kao što su predviđanje: otpora rezanja; oblika strugotine; temperature u zoni rezanja; habanja alata, a može se koristiti za različite materijale alata i obratka. Pomoću metode konačnih elemenata mogu se kreirati precizni modeli procesa obrade rezanjem, koji predstavljaju polaznu osnovu za optimizaciju parametara obrade. Na taj način je moguće smanjiti broj eksperimentalnih ispitivanja, kao i troškove izvođenja istih.

2. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Eksperimentalna ispitivanja vršena su na verikalnoj CNC glodalici. Za materijal obratka izabran je čelik za poboljšanje AISI-u 4340. Pre ispitivanja uzorci su obrađivani sa svih strana tako da su konačne dimenzije obratka bile 50x30x7 mm. U eksperimentu je korišćeno vretenasto glodalo od brzoreznog čelika sa oznakom VG Ø10 DIN 844 A-K-N (slika1).



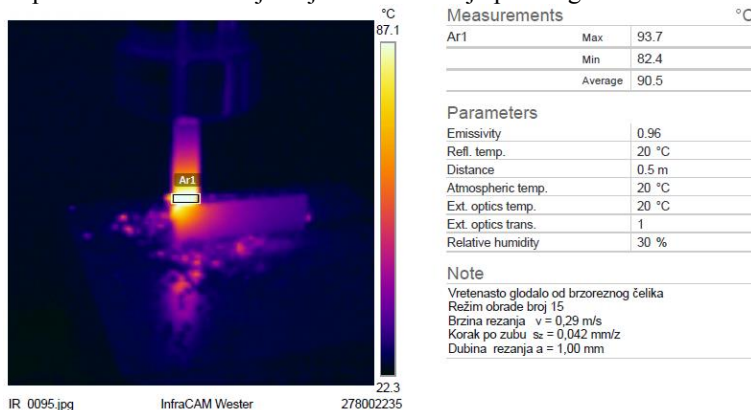
Slika 1: Vretenasto glodalo VG Ø10 DIN 844 A-K-N

Za merenje temperature u zoni rezanja korišćena je specijalna termovizijska kamera koja je osetljiva na zračenje tela koje se nalazi na određenoj temperaturi. Snimanje temperature tokom eksperimenta sprovedeno je posredstvom termovizijske kamere FLIR InfraCAM Western prikazane. Zbog emisivnosti obradak i glodalo su prethodno obojeni u crno.

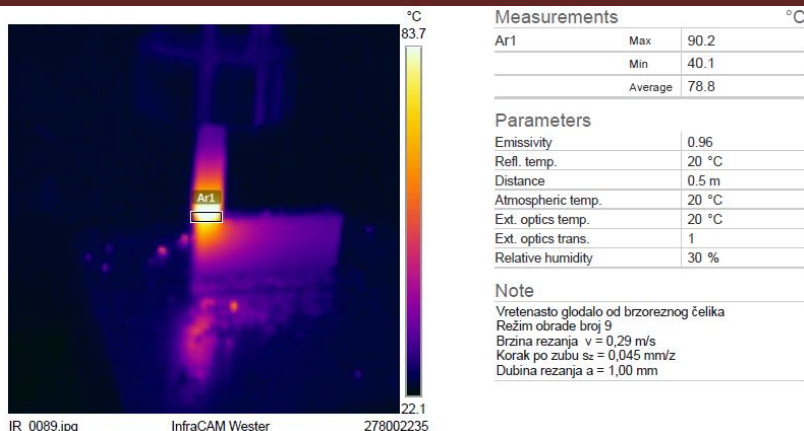
Tabela 1. Režimi obrade u eksperimentu

Režim obrade	Režim 1	Režim 2	Režim 3
brzina rezanja v , m/s	0,29	0,29	0,29
korak po zubu s_z , mm/z	0,042	0,045	0,077
dubina rezanja a , mm	1,00	1,00	1,00

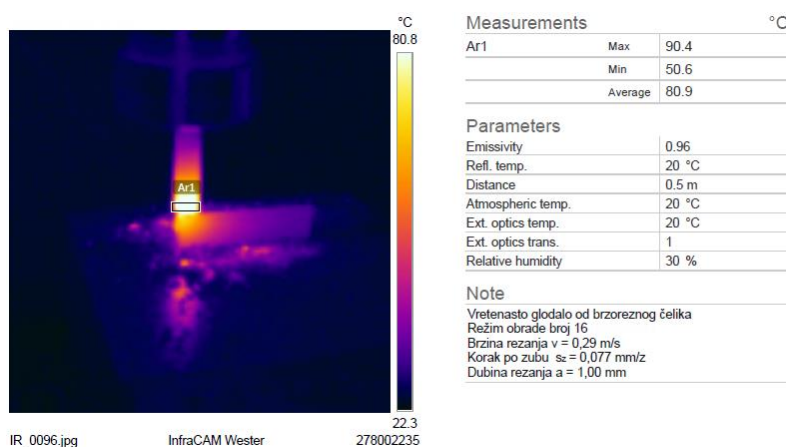
Primenom termovizijske kamere za izabrane režime obrade izmerene su temperature u zoni rezanja. Na slikama 2,3 i 4 prikazani su primeri karakterističnih snimaka raspodele temperature. Sa snimka su registrovane maksimalne, prosečne i minimalne temperature u zoni rezanja koja ima dimenzije pravougaonika 10x3 mm.



Slika 2: Snimak raspodele temperature za režim obrade 1



Slika 3: Snimak raspodele temperature za režim obrade 2



Slika 4: Snimak raspodele temperature za režim obrade 3

3. PROGRAM THIRD WAVE ADVANTEDGE

Pravilan izbor FEM (Finite Element Method) softvera je veoma važan za određivanje obima i kvaliteta analize koji će biti izveden. Neki od važnijih softvera koji se danas koriste za simulaciju obrade metala rezanjem su: ANSYS, Third Wave AdvantEdge, Abaqus i Deform 3D. Pored toga, komparativna analiza komercijalnih softverskih paketa koji koriste metodu konačnih elemenata, pruža istraživačima pomoć u izboru najpogodnijeg softvera koji može da zadovolji njihove zahteve.

Program Third Wave AdvantEdge je eksplicitni komercijalni program za projektovanje, unapređenje i optimizovanje procesa obrade. Solver ovog programa je prilagođen za obradu metala rezanjem. Ovaj softver je veoma detaljan, a istovremeno ima korisničko okruženje koje omogućava da korisnici mogu da podešavaju podatke kako za modeliranje tako i za simulacije. Sposoban je da modelira složene interakcije između alata i obratka i pokriva širok spektar različitih vrsta obrade rezanjem.

Struktura programa sastoji se od tri modula: pretprocesni modul, simulacioni modul i postprocesni modul. Pretprocesni modul predstavlja polaznu osnovu koji omogućava korisnicima da postave celu simulaciju, da definišu geometriju alata, osobine materijala i parametre obrade. U njemu se unose i podaci za kontrolu simulacije. Simulacioni modul je modul gde se zapravo odigrava simulacija. Kada se unesu podaci za modeliranje i kada se startuje simulacija, solver radi proračune koji su zasnovani na metodi konačnih elemenata. Ovi proračuni su skriveni tako da ih korisnik ne može videti. Pošto su proračuni završeni, u postprocesnom modulu se obrađuju rezultati i prikazuju u različitim formama kao što su grafikoni i slike. Između ostalih rezultata koji se dobijaju mogu se nabrojati i sledeći: oblik strugotine, temperatura alata i strugotine, otpori rezanja, habanje alata i tako dalje.

4. SIMULACIJA TOPLOTNIH POJAVA PRI OBRADI GLODANJEM U PROGRAMU ADVANTEDGE

Za kreiranje simulacije procesa obrade glodanjem u programskim paketima za analize uz pomoć metode konačnih elemenata koristi se odgovarajuća metodologija, koja se sastoji iz sledećih koraka: izrada 3D modela alata i obratka u CAD programskom paketu, uvoz modela u MKE programski paket, definisanje materijala alata i obratka, definisanje parametara za simulaciju, računarska obrada simulacije i prikaz i analiza rezultata simulacije.

Za simulaciju obrade glodanjem u programu AdvantEdge napravljen je model vretenastog glodala (EC-E4I 10-22/32W10CF72) u SolidWorks-u a zatim pojednostavljen model kako bi broj čvorova i elemenata mreže modela bio manji. U oba slučaja u obzir je uzet samo rezni deo glodala koji učestvuje u obradi. Zatim su modeli za simulaciju snimljeni kao STL fajlovi i uvezeni u AdvantEdge.

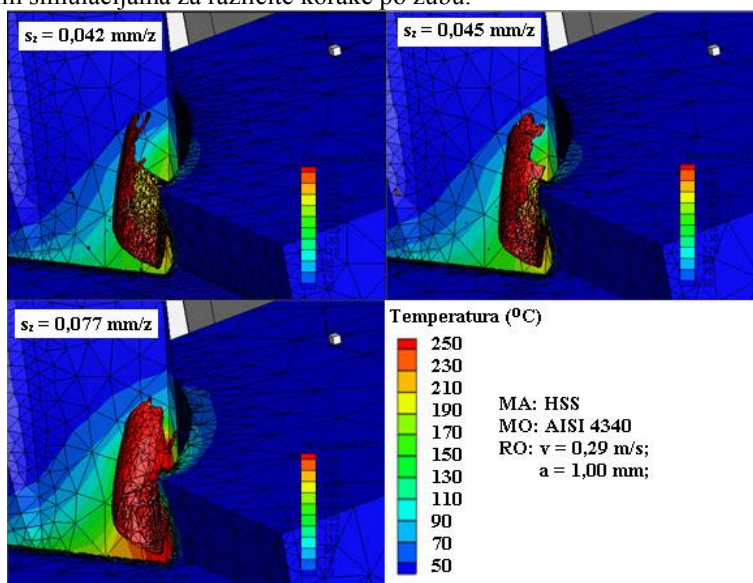
Model obratka nije kreiran u SolidWorks-u već je upotrebljena opcija Create/Edit Standard Workpiece koju pruža AdvantEdge za izbor. Materijali alata i obratka izabrani su iz svojih biblioteka. Za materijal obratak izabran je čelik AISI 4340, dok je za materijal alata izabran tvrdi metal. Pokrenuta je simulacija sa modelom pojednostavljenog glodala sa ulaznim parametrima simulacije. Kao izlazna performansa simulacije izabrana je temperatura rezanja.

5. ANALIZA UTICAJA KORAKA PO ZUBU NA TEMPERATURU REZANJA U PROGRAMU ADVANTEDGE

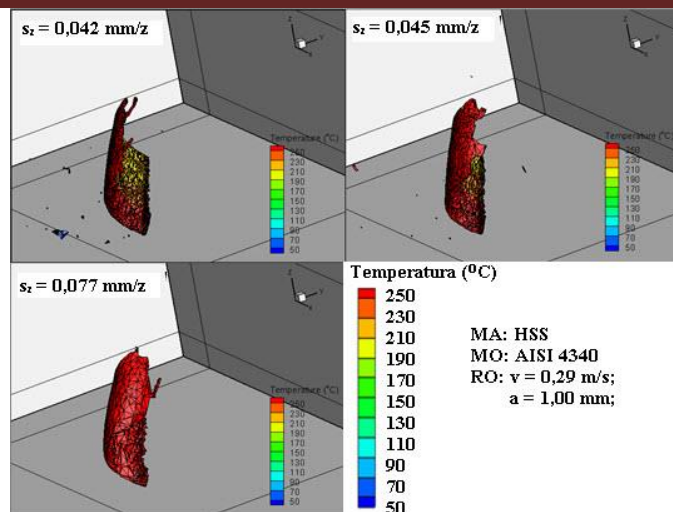
Za iste režime obrade kao u eksperimentu sa vretenastim glodalom od brzoreznog čelika kreirane su tri simulacije na osnovu kojih je analiziran uticaj koraka po zubu na temperaturu u zoni rezanja. U AdvantEdge-ovom potprogramu Tecplot mogu se uključiti uporedni prikazi rezultata simulacija izborom opcije Multi-Prosect Display.

Prikazi uporednih simulacija koje su snimljene u istim vremenskim trenucima (selektovanjem iste zone koja se prikazuje) dati su na slikama od 5 do 7. Izabran je minimalni nivo temperature od 50°C i maksimalni nivo od 250°C u 11 nivoa uvećanja. Nijanse boja koje su prikazane u donjem desnom uglu povezane su sa nijansama boja na alatu, obratku i strugotini pri čemu su plavom bojom prikazane minimalne temperature a crvenom maksimalne.

Na slici 5 izabrana je zona u kojoj zub izlazi iz zahvata i može se uočiti da je vrh zuba u simulaciji sa najvećim korakom po zubu u crvenoj zoni odnosno da je u ovom slučaju temperatura najviša, dok slika 6 daje prikaz strugotine na uporednim simulacijama za različite korake po zubu.

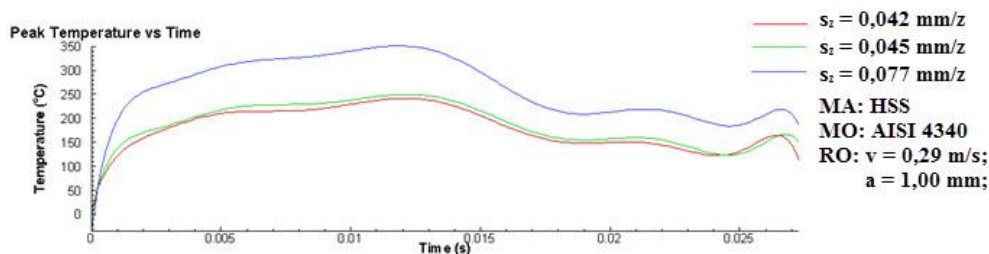


Slika 5: Prikaz uporednih simulacija sa različitim korakom po zubu



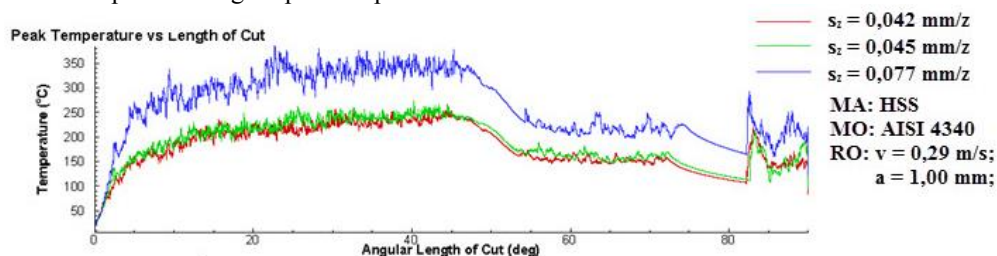
Slika 6: Izdvojeni prikaz strugotine na uporednim simulacijama

Na slici 7 prikazani su uporedni dijagrami temperature u zoni rezanja (najviše vrednosti) u odnosu na vreme obrade za izabrane režime obrade. Sa dijagrama se može uočiti da povećanje koraka po zubu bitno utiče na povećanje temperature u zoni rezanja. Ponovni skok temperature se javlja prilikom ulaska novog zuba u zahvat.



Slika 7: Prikaz dijagrama temperatura-vreme simulacije za različiti korak rezanja

Na slici 8 prikazan je dijagram zavisnosti temperature od ugaone dužine obrade. Za dužinu ugaone obrade od 90° može se videti da temperatura naglo opada na polovini dužine obrade.



Slika 8. Prikaz dijagrama temperatura-ugaona dužina obrade za različiti korak rezanja

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se u programu AdvantEdge mogu sa velikom pouzdanošću analizirati temperature u zoni rezanja za simulacije obrade glodanjem. Nakon kreiranja simulacija, zahvaljujući potprogramu Tecplot, mogu se direktno analizirati uticaji elementa režima obrade na temperaturu rezanja. Za odgovarajuće režime obrade može se na pogodan način analizirati uticaj koraka po zubu na temperaturu u zoni rezanja. Precizna geometrija alata omogućava dobijanje pouzdanijih rezultata u predviđanju temperature u zoni rezanja, iako to značajno utiče na povećanje vremena potrebnog da se obradi simulacija.

LITERATURA

- Bontiu Pop A., Lobontiu M. (2015): The finite element analysis approach in metal cutting. *Academic journal of manufacturing engineering*, 13(1).
- Grzesik, W., Nieslony, P., Habrat, W. Laskowski, P. (2015): Influence of cutting conditions on temperature distribution in face milling of inconel 718 nickel-chromium alloy *Journal of Machine Engineering*, 15(2).
- Kovač, P., Savković, B., Kulundžić, N., Gostimirović, M., Hloješovsky, F., Sekulić, M. (2015): Simulation of temperature distribution on the 3D moving cutting tool, Development in Machining Technology, Scientific Research Reports, Cracow University of Technology, 5, pp. 20-26.
- Kulundžić, N., Gostimirović, M., Kovač, P., Sekulić, M., Savković, B. (2015): Microcutting Simulation of Abrasive Grains In The Grinding Process. *Journal of Production Engineering*, 18(2), pp 25-28, ISSN 1821- 4932, FTN Novi Sad.
- Le Coz, G., Dudzinski, D. (2014): Temperature variation in the workpiece and in the cutting tool when dry milling Inconel 718, *International journal of advanced manufacturing technology*.
- Li, A., Zhao, J., Pei, Z., Zhu, N. (2014): Simulation-based solid carbide end mill design and geometry optimization, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 71(9), pp. 1889-1900.
- Mitrović, A., Kovač, P., Kulundžić, N., Savković, B. (2016 c): 3D finite element simulation of milling, *Journal of Production Engineering*, 1, pp. 31-34, ISSN 1821- 4932, FTN, Novi Sad.
- Nieslony, P., Grzesik, W., Habrat, W. (2015): Experimental and simulation investigations of face milling process of Ti6Al4V titanium alloy, *Advances in manufacturing science and technology*, 39(1).
- Shindou, M., Matsuda, R., Furuki, T. (2015): Investigation of tool internal temperature in end-milling process with a wireless holder system, *Advance Publication by J-STAGE*
- Shindou, M., Kodama, H., Hirogaki, T., Aoyama, E. (2015): Monitoring of End-Mill Process Based on Infrared Imagery with a High Speed Thermography, *Key Engineering Materials*, 625, pp 213-218.
- Tamizharasan, T., Senthikumar, N. (2014): Numerical simulation of effects of machining parameters and tool geometry using DEFORM-3D: Optimization and experimental [36] validation, *World Journal of Modelling and Simulation*, 10(1), pp. 49-59.