



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U  
NOVOM SADU

---



mr Anđelija Mitrović

# **MODELIRANJE PROCESA OBRADJE REZANJEM**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2016.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА  
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, <b>РБР:</b>			
Идентификациони број, <b>ИБР:</b>			
Тип документације, <b>ТД:</b>	Монографска публикација		
Тип записа, <b>ТЗ:</b>	Текстуални штампани материјал		
Врста рада, <b>ВР:</b>	Докторска дисертација		
Аутор, <b>АУ:</b>	мр Анђелија Митровић, дипл. инж. маш.		
Ментор, <b>МН:</b>	др Павел Ковач, редовни професор		
Наслов рада, <b>НР:</b>	Моделирање процеса обраде резањем		
Језик публикације, <b>ЈП:</b>	Српски		
Језик извода, <b>ЈИ:</b>	Српски/Енглески		
Земља публиковања, <b>ЗП:</b>	Република Србија		
Уже географско подручје, <b>УГП:</b>	АП Војводина		
Година, <b>ГО:</b>	2016.		
Издавач, <b>ИЗ:</b>	Ауторски репринт		
Место и адреса, <b>МА:</b>	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6		
Физички опис рада, <b>ФО:</b> (поглавља/страница/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	10/112/102/19/106/0/2		
Научна област, <b>НО:</b>	Машинско инжењерство		
Научна дисциплина, <b>НД:</b>	Процеси обраде скидањем материјала и симулације		
Предметна одредница/Кључне речи, <b>ПО:</b>	Моделирање, параметри обраде, обрада глодањем вретенастим глодалима, метода коначних елемената		
<b>УДК</b>			
Чува се, <b>ЧУ:</b>	Библиотека ФТН, Нови Сад		
Важна напомена, <b>ВН:</b>			
Извод, <b>ИЗ:</b>	У раду је извршено моделирање и симулација процеса обраде глодањем са предвиђањем температуре у зони резања помоћу методе коначних елемената. Као улазни параметри обраде за модел узети су брзина резања, корак и дубина резања а као излазна перформанса температура у зони резања. Креирани модел за симулацију обраде глодањем проверен је експерименталним тестирањем са истим параметрима обраде. Извршена је анализа експерименталних резултата са предложеним моделом. Резултати овог истраживања су показали да се моделирањем и симулацијом процеса обраде глодањем може адекватно предвидети температура у зони резања.		
Датум прихватања теме, <b>ДП:</b>	26.04.2012.		
Датум одбране, <b>ДО:</b>	--.--2016.		
Чланови комисије, <b>КО:</b>	Председник:	Проф. др Марин Гостимировић, ред. професор	Потпис ментора
	Члан:	Проф. др Драган Шешлија, ред. професор	
	Члан:	Проф. др Богдан Недић, ред. професор	
	Члан:	Проф. др Миленко Секулић, ванр. професор	
	Члан, ментор:	Проф. др Павел Ковач, ред. професор	

Образац Q2.НА.06-05- Издање 1



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES  
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monographic publication
Type of record, <b>TR</b> :	Textual material, printed
Contents code, <b>CC</b> :	Doctoral Thesis
Author, <b>AU</b> :	Andjelija Mitrovic, MSc in Mechanical Engineering
Mentor, <b>MN</b> :	Prof. dr Pavel Kovac, Ph.D.
Title, <b>TI</b> :	Modeling of cutting processes
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian / English
Country of publication, <b>CP</b> :	Republic of Serbia
Locality of publication, <b>LP</b> :	AP Vojvodina
Publication year, <b>PY</b> :	2016.
Publisher, <b>PB</b> :	Authors reprint
Publication place, <b>PP</b> :	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovica 6
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	10/112/102/19/106/0/2
Scientific field, <b>SF</b> :	Mechanical Engineering
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Material removal processes and simulations
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Modeling, cutting parameters, end milling, finite element method
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	FTS Library
Note, <b>N</b> :	
Abstract, <b>AB</b> :	The work explains process of modeling and simulation of milling predictive temperature in the cutting zone by using the finite element method. The input parameters for the processing model are cutting speed, feed and depth of a cut. The temperature in the cutting zone was used as an output performance. Designed model that simulates milling is checked by experimental testing with the same machining parameters. The analysis of the experimental results with the proposed model was carried out. Results of this study show that the modeling and simulation of milling process can adequately predict the temperature in the cutting zone.
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	26.04.2012.
Defended on, <b>DE</b> :	--.--.2016.
Defended Board, <b>DB</b> :	
President:	Prof. Marin Gostimirovic, PhD
Member:	Prof. Dragan Seslija, PhD
Member:	Prof. Bogdan Nedic, PhD
Member:	Assoc. Prof. Milenko Sekulic, PhD
Member, Mentor:	Prof. Pavel Kovac, PhD

Obrazac Q2.HA.06-05- Izdanje 1

### **PREGLED KORIŠĆENIH OZNAKA:**

$\alpha$	- ledni ugao
$\gamma$	- grudni ugao
$\varepsilon$	- deformacija
$\theta$	- temperatura rezanja
$\theta_r$	- sobna temperatura
$\theta_m$	- temperatura topljenja
$\mu$	- koeficijent trenja
$\sigma$	- napon
$\tau$	- napon smicanja
$\chi$	- napadni ugao
$\omega$	- ugao zavojnice
a	- dubina rezanja
n	- broj obrtaja
$s_z$	- pomak po zubu
v	- brzina rezanja
$t_g$	- glavno vreme obrade
z	- broj zuba glodala

### **PREGLED KORIŠĆENIH SKRAĆENICA:**

ALE	- Arbitražni Lagranž-Ojler
AlTiNi	- Aluminiјum titaniјum nitrid
BČ	- Brzorezni čelik
CAD	- Computer Aided Design (računarom podržano projektovanje)
FEA	- Finite Element Analysis (analiza pomoću konačnih elemenata)
FEM	- Finite Element Method (metod konačnih elemenata)
MA	- Materijal alata
MKE	- Metod konačnih elemenata
MO	- Materijal obrade
RO	- Režim obrade
TiN	- Titanijum nitrid
TiAlNi	- Titanijum aluminijum nitrid
TM	- Tvrdi metal
WC	- Volfram karbid
WC-Co	- Volfram karbid-kobalt

## Sadržaj

1	UVOD .....	1
1.1	Uvodne napomene .....	1
1.2	Predmet istraživanja .....	2
1.3	Ciljevi istraživanja.....	3
1.4	Osnovne hipoteze .....	3
1.5	Očekivani rezultati istraživanja.....	4
1.6	Pregled rada po poglavljima.....	4
2	ISTRAŽIVANJE PROCESA OBRADE METALA REZANJEM KROZ ANALIZU TOPLOTNIH POJAVA U ZONI REZANJA .....	6
2.1	Nastanak i distribucija toplote pri rezanju.....	6
2.2	Temperatursko polje pri rezanju .....	8
2.3	Uticajni faktori na temperaturu rezanja.....	9
2.4	Pregled metoda merenja temperature rezanja .....	10
3	METODA KONAČNIH ELEMENATA .....	14
3.1	Definicija metode konačnih elemenata .....	14
3.2	Analiza pomoću metode konačnih elemenata .....	15
3.3	Metoda konačnih elemenata u obradi metala rezanjem .....	16
3.4	Konstitutivni modeli radnog materijala.....	17
3.4.1	Oxley model materijala.....	17
3.4.2	Johnson-Cook model materijala .....	18
3.4.3	Zerilli i Armstrong model materijala .....	18
3.5	Modeli trenja .....	19
3.5.1	Coulomb-ov model trenja .....	19
3.5.2	Model smicanja.....	19
3.6	Definisanje graničnih uslova simulacije .....	19
3.6.1	Lagranžov model .....	19
3.6.2	Ojlerov model .....	20
3.6.3	Arbitražni Lagranž-Ojlerov model (ALE) .....	20
3.7	Kriterijumi formiranja strugotine .....	21
3.8	Definisanje mreže konačnih elementa.....	22
3.8.1	Programski paket ANSYS .....	23
3.8.2	Programski paket <i>Third Wave AdvantEdge</i> .....	27
3.9	Pregled dosadašnjih istraživanja u obradi metala rezanjem metodom konačnih elemenata.....	29

4	MODELIRANJE PROCESA OBRADE PRIMENOM VIŠEFAKTORNOG PLANA EKSPERIMENTA .....	36
4.1	Višefaktorni planovi .....	36
4.2	Višefaktorni planovi drugog reda .....	37
4.2.1	Centralni kompozicioni planovi drugog reda .....	37
4.3	Trofaktorni planovi drugog reda .....	39
4.3.1	Regresiona analiza .....	39
4.3.2	Kodiranje i izbor faktora eksperimenta .....	39
4.3.3	Određivanje koeficijenta regresije .....	40
4.3.4	Dekodiranje trofaktornog modela drugog reda .....	42
4.3.5	Disperziona analiza .....	43
4.3.6	Ocena tačnosti matematičkog modela .....	44
5	EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA .....	45
5.1	Uslovi pri eksperimentalnom ispitivanju .....	45
5.1.1	Materijal predmeta obrade .....	45
5.1.2	Alat .....	46
5.1.3	Mašina alatka .....	47
5.1.4	Režim obrade .....	48
5.2	Plan i opis eksperimentalnih ispitivanja .....	49
5.2.1	Merenje temperature u zoni rezanja .....	49
5.3	Rezultati eksperimentalnih ispitivanja .....	52
5.3.1	Model temperature u zoni rezanja za glodalo od tvrdog metala .....	57
5.3.2	Model temperature u zoni rezanja za glodalo od brzoreznog čelika .....	59
6	SIMULACIJA TOPLOTNIH POJAVA PRI GLODANJU U PROGRAMSKOM PAKETU ANSYS .....	62
6.1	Izrada 3D modela vretenastog glodala u programskom paketu <i>SolidWorks</i> .....	62
6.2	Uvoz 3D modela .....	69
6.3	Definisanje materijala alata i obratka .....	70
6.4	Definisanje parametara za simulaciju obrade glodanjem .....	72
6.5	Računarska obrada simulacije .....	77
6.6	Prikaz i analiza rezultata simulacije .....	77
6.6.1	Simulacija vretenastog glodanja sa izabranim režimom obrade .....	77
7	SIMULACIJA TOPLOTNIH POJAVA PRI GLODANJU U PROGRAMSKOM PAKETU <i>ADVANTEDGE</i> .....	81
7.1	Izrada 3D modela vretenastog glodala u programskom paketu <i>SolidWorks</i> .....	81
7.2	Uvoz 3D modela .....	81

7.3	Definisanje materijala alata i obratka.....	84
7.4	Definisanje parametara za simulaciju obrade glodanjem.....	84
7.5	Računarska obrada simulacije.....	88
7.6	Prikaz i analiza rezultata simulacije.....	88
7.6.1	Simulacija vretenastog glodanja sa izabranim režimom obrade.....	88
8	ANALIZA REZULTATA.....	92
8.1	Analiza uticaja elemenata režima obrade na temperaturu rezanja u <i>AdvantEdge</i> -u za glodalo od brzoreznog čelika.....	92
8.1.1	Uticaj dubine rezanja na temperaturu rezanja.....	92
8.1.2	Uticaj koraka po zubu na temperaturu rezanja.....	96
8.1.3	Uticaj brzine rezanja na temperaturu rezanja.....	99
8.2	Analiza rezultata dobijenih eksperimentom, trofaktornim modelom i simulacijama u <i>AdvantEdge</i> -u.....	102
8.2.1	Poređenje različitih načina merenja temperature rezanja termovizijskom kamerom i simulacijama u <i>AdvantEdge</i> -u.....	104
9	ZAKLJUČAK.....	105
10	LITERATURA.....	107
	PRILOG 1 – Izveštaj termovizijske kamere	
	PRILOG 2 – Trofaktorni planovi eksperimenata	

# 1 UVOD

## 1.1 Uvodne napomene

Obrada metala rezanjem je danas jedna od najčešće korišćenih proizvodnih tehnologija u metaloprerađivačkoj industriji. To je proces obrade u kome se oblik radnog predmeta dobija odstranjivanjem suvišnog materijala u vidu strugotine. Ova obrada je najzastupljenija jer omogućava proizvodnju složenih delova sa tačnom merom i zahtevanim kvalitetom obrade u relativno kratkom vremenu.

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. U svakom slučaju, treba imati u vidu da su proizvodni eksperimenti skupi i dugotrajni, 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 najvažnijih konvencionalnih postupaka rezanja koji se koristi u metaloprerađivačkoj industriji. Takođe, to je jedan od najsloženijih procesa obrade metala rezanjem jer obrada sa glodalom, kao višesečnim 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.

Osim toga, smatra se da je posle struganja, glodanje najzastupljeniji proces obrade, pri kome se skida strugotina. Najzastupljeniji tip glodanja je čeonno glodanje sa glavama za glodanje, a zatim glodanje vretenastim glodalima. Proces glodanja vretenastim glodalima je jedan od tipičnih prekidnih procesa. U tom procesu, 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 čeonnom glodanju koriste se različite metode. Zbog složenosti procesa obrade glodanjem 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 veoma 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. Ove metode obuhvataju merenje temperature pomoću infracrvenog pirometra, odnosno pomoću infracrvene termovizijske kamere. Pokazalo se da je metoda merenja temperature infracrvenom termovizijskom kamerom najpogodnija metoda 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 među numeričkim metodama, 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 elemenata, 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 pomoću ažuriranog Lagranžovog elasto-plastičnog trodimenzionalnog modela koji je ograničen na početne faze formiranja strugotine.

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 programski paketi, koji koriste metodu konačnih elemenata sa novim razvijenim matematičkim modelima, instalirani na super računarima, dali su istraživačima relevantne podatke o svojevrsenoj 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.

Pravilan izbor *FEM (Finite Element Method)* programskog paketa 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 programskih paketa koji koriste metodu konačnih elemenata, pruža istraživačima pomoć u izboru najpogodnijeg softvera koji može da zadovolji njihove zahteve.

U poslednjih nekoliko godina pojavio se veliki broj radova koji se odnose na modeliranje procesa obrade rezanjem ali se većina radova odnosi na obradu struganjem i određivanje otpora rezanja. Mnogo manji broj istraživača posvetio se modeliranju procesa obrade glodanjem i određivanju temperature u zoni rezanja (Pantel i dr., 2008; Escamilla i dr., 2010; Constantin i dr., 2010 a; Fedorov i Skuratov, 2014; Grzesik i dr., 2015).

## **1.2 Predmet istraživanja**

Obrada rezanjem je najčešće finalna obrada u proizvodnim procesima pri dobijanju gotovih proizvoda i još uvek je najzastupljenija u industriji obrade metala. Kontaktne površine alata u procesu obrade rezanjem izložene su ekstremno visokim pritiscima i trenju. Mehanička

energija koja se troši na deformaciju i skidanje materijala gotovo se u potpunosti pretvara u toplotnu energiju. Zbog toga se u zoni rezanja razvijaju visoke temperature koje dovode do fizičko hemijskih reakcija na kontaktnim površinama alata.

Temperature u zoni rezanja bile su i ostale predmet istraživanja mnogih istraživača (Kovač, 1987; Ming i dr., 2003; Grzesik i dr., 2004; Brandao i dr., 2008; Pittala i Manno, 2010; Le Coz i Dudzinski, 2014; Niesłony i dr., 2015). Predmet istraživanja ove doktorske disertacije odnosi se na primenu metode konačnih elemenata za određivanje temperature u zoni rezanja pri obradi glodanjem, obzirom da ova metoda nije dovoljno zastupljena u istraživanjima.

### 1.3 Ciljevi istraživanja

Cilj rada je modeliranje i simulacija procesa obrade glodanjem sa predviđanjem temperatura u zoni rezanja pomoću metode konačnih elemenata. Iako je obrada glodanjem, kao jedan od najčešćih i najsloženijih konvencionalnih postupaka obrade, pod uticajem velikog broja izlaznih performansi, jedan od najznačajnijih parametara je temperatura jer direktno utiče na habanje, odnosno postojanost alata. Zbog toga se može reći da je predviđanje temperature u zoni rezanja ključni cilj za razumevanje i optimizaciju parametara obrade. S obzirom da su eksperimentalne metode istraživanja skupe i zahtevaju dosta vremena, cilj je razviti alternativni pristup za brzo predviđanje procesa mašinske obrade.

Takve mogućnosti pružaju programski paketi *ANSYS/Explicit Dynamics* i *Third Wave AdvatEdge*. Simulacija procesa rezanja treba da omogući bolje razumevanje procesa obrade glodanjem i smanji broj eksperimenata. Osim toga modeliranje i simulacija procesa obrade glodanjem pružaju mogućnost za poboljšanje izbora optimalnih parametara obrade. Dobijeni računarski 3D model, sa stanovišta toplotne analize, trebalo bi da daje zadovoljavajuće rezultate koji se poklapaju sa eksperimentalnim.

U tom kontekstu cilj rada je kreiranje 3D modela glodala i predmeta obrade u programskom paketu *SolidWorks* kroz virtuelni model obrade glodanjem metodom konačnih elemenata. Kao ulazni parametri režima obrade za model uzeće se brzina rezanja, korak i dubina rezanja. Za predviđanje toplotnih pojava u obradi glodanjem koristiće se programski paketi *ANSYS/Explicit Dynamics* i *Third Wave AdvatEdge*. Kreirani model za simulaciju obrade glodanjem biće proveren eksperimentalnim testiranjem sa istim parametrima režima obrade za modeliranje temperature u zoni rezanja. Na kraju će se sprovesti analiza dobijenih eksperimentalnih rezultata sa predloženim modelom i simulacijom procesa obrade glodanjem primenom metode konačnih elemenata.

### 1.4 Osnovne hipoteze

Na samom početku istraživanja, osnovna polazna hipoteza je bila da će kreirani model za simulaciju obrade glodanjem uz pomoć metode konačnih elemenata biti dovoljno pouzdan za predviđanje temperature u zoni rezanja. Pretpostavlja se da će za simulaciju izabrani programski paketi, kao što su *ANSYS/Explicit Dynamics* i *Third Wave AdvatEdge*, dati dobre rezultate u odnosu na eksperimentalno dobijene rezultate.

Takođe, pretpostavlja se da će poznavanjem temperature u zoni rezanja moći da se utiče na optimalan izbor režima obrade kako bi se postigla veća ekonomičnost i kvalitet proizvodnje.

## 1.5 Očekivani rezultati istraživanja

Dosadašnja istraživanja i rezultati, između ostalog, pokazuju kako se modeliranjem i simulacijom procesa obrade glodanjem primenom metode konačnih elemenata može ostvariti adekvatno predviđanje temperature u zoni rezanja. Primenom programskih paketa *ANSYS/Explicit Dynamics* i *Third Wave AdvantEdge* ova važna izlazna performansa može se predvideti i bez eksperimentalnih ispitivanja.

U okviru ovog istraživanja potrebno je realizovati sledeće:

- pregled istraživanja temperature rezanja pri obradi glodanjem,
- pregled dosadašnjih istraživanja u obradi glodanjem metodom konačnih elemenata,
- eksperimentalna ispitivanja temperature u zoni rezanja,
- kreiranje 3D modela procesa obrade glodanjem metodom konačnih elemenata pomoću programskih paketa *ANSYS/Explicit Dynamics* i *Third Wave AdvantEdge*,
- analiza toplotnih pojava pri glodanju na osnovu rezultata dobijenih metodom konačnih elemenata,
- analiza eksperimentalnih rezultata sa rezultatima dobijenim metodom konačnih elemenata.

## 1.6 Pregled rada po poglavljima

U prvom poglavlju razmatrani su predmet i ciljevi istraživanja, osnovne hipoteze i očekivani rezultati istraživanja. Na kraju poglavlja dat je pregled rada po poglavljima.

Drugo poglavlje sadrži teorijske osnove generisanja i distribucije toplote pri obradi rezanjem. Analizirano je temperatursko polje zone rezanja i ulazni parametri koji utiču na temperaturu rezanja. Posebno su izdvojena i analizirana tri osnovna ulazna parametra u procesu obrade metala rezanjem, tj. brzina rezanja, pomak i dubina rezanja. Takođe, na sistematizovan način je dat pregled dosadašnjih istraživanja tehnika i metoda merenja temperature rezanja.

Na početku trećeg poglavlja polazi se od teorijskih osnova metode konačnih elemenata (MKE) i moguće primene ove metode u obradi metala rezanjem. Nakon toga opisani su konstitutivni modeli radnog materijala, definisani granični uslovi simulacije i postavljeni kriterijumi za odvijanje procesa obrade rezanjem. Zatim je objašnjeno definisanje mreže konačnih elemenata i uticaj koji krupnoća i tip mreže mogu imati na tačnost rezultata simulacije. U nastavku poglavlja, s obzirom na to da je veoma važan pravilan izbor programskih paketa za simulaciju procesa obrade rezanjem metodom konačnih elemenata, prikazane su mogućnosti koje pružaju programski paketi *ANSYS* i *Third Wave AdvantEdge*. Na kraju poglavlja dat je pregled i kritički osvrt na dosadašnja istraživanja procesa obrade metala rezanjem, metodom konačnih elemenata.

U četvrtom poglavlju je na vrlo detaljan i sistematičan način dat teorijski prikaz modeliranja procesa obrade rezanjem primenom trofaktornog plana eksperimenta drugog reda, korišćenjem modela bez međusobnog uticaja i sa međusobnim uticajem.

Postupak eksperimentalnih istraživanja je detaljno prikazan u petom poglavlju. U ovom poglavlju prvo su dati uslovi pri eksperimentalnom ispitivanju temperature u zoni rezanja pri obradi glodanjem i to u pogledu materijala obratka, mašine alatke, alata i režima obrade. U nastavku je prikazana metodologija višefaktornog plana eksperimenta. Za ulazne nezavisne

parametre izabrani su: brzina rezanja, pomak po zubu i dubina rezanja. Vrednosti ovih parametara su varirane na osnovu preporuka proizvođača alata, odnosno s obzirom na ograničenja mašine alatke. Sledi detaljan prikaz metode merenja temperature rezanja termovizijskom kamerom. Na kraju poglavlja prikazani su tabelarno sistematizovani rezultati eksperimentalnih istraživanja.

U šestom poglavlju prikazana je metodologija za kreiranje simulacije procesa obrade rezanjem pri vretenastom glodanju pomoću metode konačnih elemenata u programskom paketu *ANSYS*. Dat je detaljan prikaz svakog od koraka metodologije u navedenom programskom paketu, kao i prikaz simulacije vretenastog glodanja sa izabranim režimom obrade. Na osnovu kreiranih simulacija uočeni su značajna problemi za pouzdanu analizu temperature u zoni rezanja, čime se u daljem radu dobijeni rezultati u *ANSYS*-u ne analiziraju.

U sedmom poglavlju prikazana je metodologija za kreiranje simulacije procesa obrade rezanjem pri vretenastom glodanju pomoću metode konačnih elemenata u programskom paketu *AdvantEdge*. Dat je detaljan prikaz metodologije, kao i prikaz simulacije vretenastog glodanja sa izabranim režimom obrade. Sprovedene simulacije u *AdvantEdge*-u su ukazale na mogućnost pouzdane analize temperature u zoni rezanja pri obradi vretenastim glodalima.

U osmom poglavlju prikazani su rezultati analize uticaja elemenata režima obrade na temperaturu rezanja pri obradi vretenastim glodalom. Analizirani su rezultati istraživanja dobijeni eksperimentom, trofaktornim modelom drugog reda i simulacijama metodom konačnih elemenata u programskom paketu *AdvantEdge*-u. Rezultati analize su prikazani u vidu dijagrama koji su koncipirani tako da daju vrednosti temperatura rezanja pri različitim režimima obrade. Uporedni prikazi analiziranih rezultata su predstavljani i obrazloženi na jasan i precizan način.

U devetom poglavlju dati su ključni zaključci izvedeni na osnovu sprovedenih rezultata istraživanja, tj. njihove analize i diskusije. Na kraju poglavlja dati su predlozi za buduća istraživanja, kao što su prevazilaženja određenih nedostataka pri simulaciji procesa u pomenutim programskim paketima, zatim mogućnosti implementacije ove metode modeliranja procesa u različitim vrstama obrade rezanjem, ispitivanje većeg broja izlaznih performansi itd. Time se postavlja dobra osnova za definisanje daljih pravaca istraživanja u posmatranoj naučnoj oblasti.

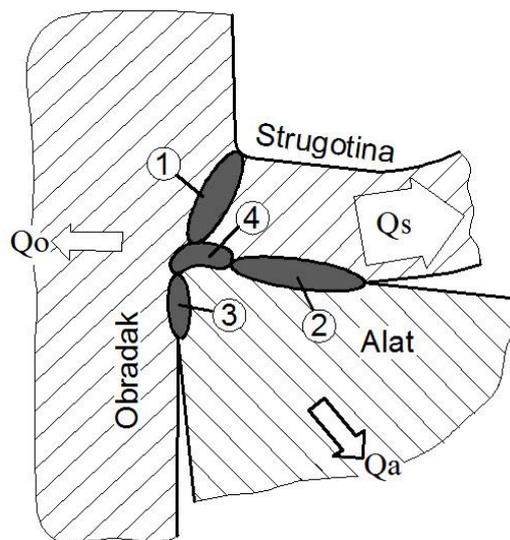
## 2 ISTRAŽIVANJE PROCESA OBRADJE METALA REZANJEM KROZ ANALIZU TOPLOTNIH POJAVA U ZONI REZANJA

### 2.1 Nastanak i distribucija toplote pri rezanju

Skoro celokupna dovedena mehanička energija koja se troši u zoni rezanja na elastične i plastične deformacije, trenje na dodirnim površinama i unutrašnje trenje u materijalu transformiše se u toplotnu energiju (Kovač, 1988).

Pretvaranje mehaničke energije u toplotnu odvija se u četiri karakteristične zone, kako je prikazano na slici 2.1, pri čemu se pojedine zone delimično preklapaju.

U zoni smicanja (1) i kočionom sloju (4) vrši se deformacija materijala obratka. Toplota trenja nastaje u zonama kontakta grudne površine alata i strugotine (2) i leđne površine alata i obratka (3) kao i kočionom sloju (4) zbog unutrašnjeg trenja slojeva materijala strugotine (Milikić i dr., 2008).



Slika 2.1: Šema nastajanja i distribucije toplotne energije pri rezanju

Ove zone predstavljaju toplotne izvore pri rezanju. Iz toplotnih izvora toplota se distribuira u alat, obradak, strugotinu, i okolinu (slika 2.2).

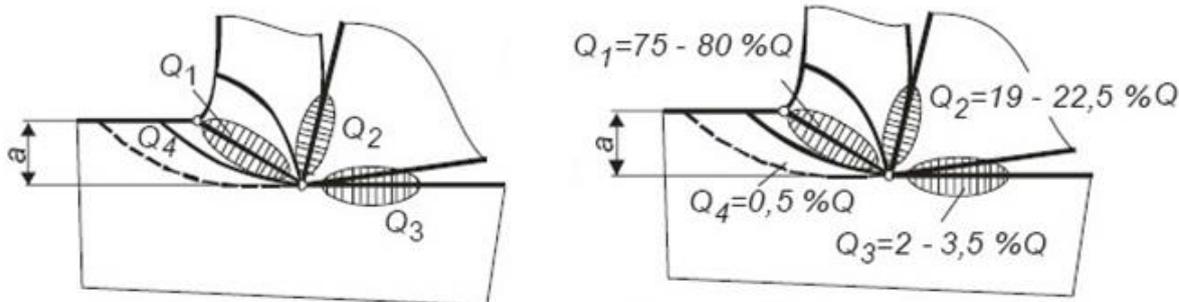
Količina toplote iz prvog izvora  $Q_1$  se kreće u granicama 75÷80 % u zavisnosti od brzine rezanja.

Drugi po veličini izvor toplote je na grudnoj površini  $Q_2$  i daje 19÷22,5 % toplote i raste sa povećanjem brzine rezanja.

Usled trenja na leđnoj površini  $Q_3$  nastaje vrlo malo toplote od 2÷3,5 % jer je ova površina mala i smanjuje se sa povećanjem brzine rezanja.

Usled unutrašnjeg trenja  $Q_4$  razvija se najmanja količina toplote oko 0,5 % (Kovač i Milikić, 1988).

Kratka analiza toplotnih izvora pokazuje da se najveća količina toplote generiše u zoni deformisanja i na kontaktu grudne površine reznog klina alata i strugotine (slika 2.2). Upravo su to i oblasti kojima se, u analizi problematike procesa rezanja i posvećuje najveća pažnja (Nedić i Lazić, 2007).

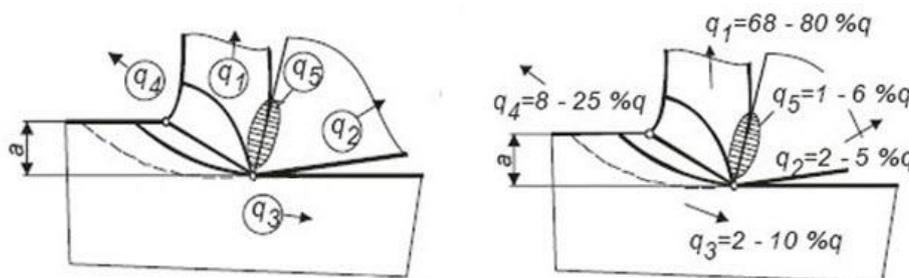


Slika 2.2: Toplotni izvori (Nedić i Lazić, 2007)

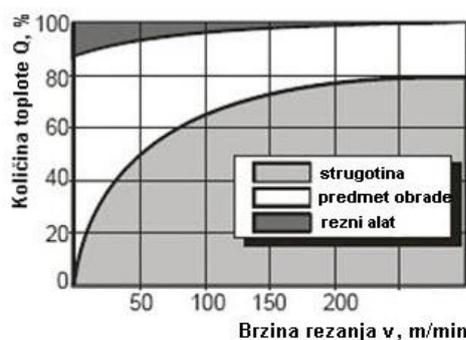
Karakter distribucije toplote zavisi od postupka obrade, brzine rezanja, toplotne provodljivosti materijala predmeta obrade i alata, dimenzija predmeta obrade i alata.

Toplotni ponori ( $q$ ) su (slika 2.3a):

- $q_1 = (68 \div 80) \%q$  - strugotina; odvodi veći deo toplote generisane izvorom  $Q_1$  i deo toplote od izvora  $Q_2$ ,
- $q_2 = (2 \div 5) \%q$  - rezni alat; odvodi veći deo toplote generisane izvorom  $Q_2$  i deo toplote od izvora  $Q_3$ ,
- $q_3 = (2 \div 10) \%q$  - predmet obrade; odvodi toplotu generisanu izvorom  $Q_4$  i deo toplote od izvora  $Q_2$  i  $Q_3$ ,
- $q_4 = (8 \div 25) \%q$  - okolina (sredstvo za hlađenje i podmazivanje); odvodi deo ukupne generisane toplote,
- $q_5 = (1 \div 6) \%q$  - površinski slojevi alata.



a) Toplotni ponori



b) Procentualni udeo odvođenja toplote

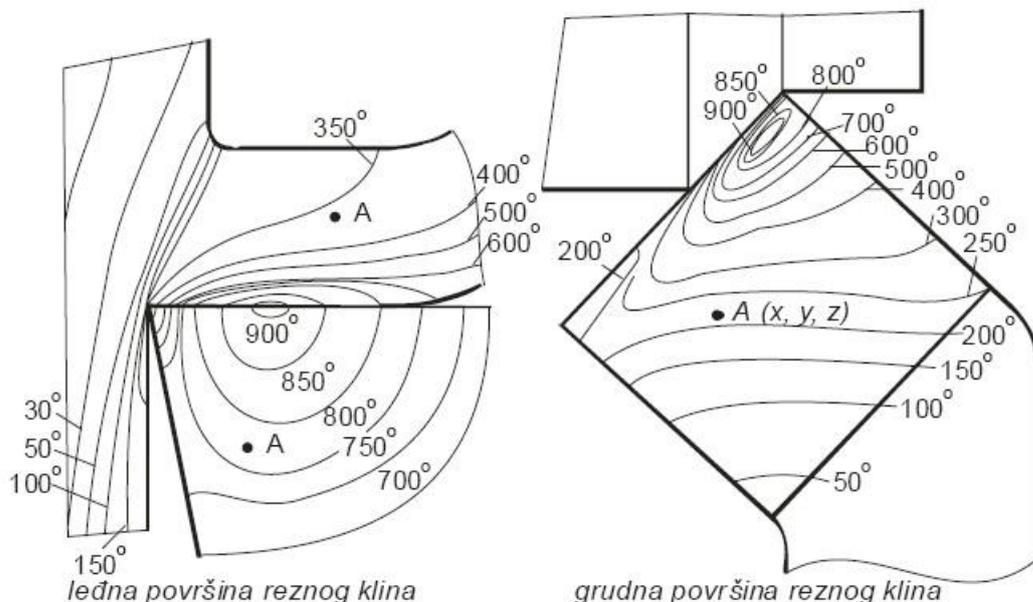
Slika 2.3: Toplotni ponori i procentualni udeo odvođenja toplote pri struganju (Nedić i Lazić, 2007)

Koliko će toplotne energije u datim uslovima rezanja biti odvedeno preko strugotine, obratka i alata, u najvećoj meri zavisi od brzine rezanja. Na slici 2.3b dati su rezultati kalorimetrijskih merenja distribucije toplotne energije pri obradi struganjem u zavisnosti od brzine rezanja. Vidi se da sa povećanjem brzine rezanja količina toplote koja odlazi sa strugotinom se stalno povećava, a preko obratka i alata smanjuje. Pri vrlo visokim brzinama rezanja, kojima se stalno teži, moglo bi se postići da se celokupna toplota koja nastaje pri rezanju odvodi preko strugotine, što je vrlo povoljno. Za brzinu rezanja od 150m/min, koje se danas najčešće koriste pri struganju čelika alatima od TM, distribucija toplote se ostvaruje tako što oko 80 % odvodi strugotina, oko 15 % obradak, a oko 5 % alat (Kovač i Milikić, 1988).

## 2.2 Temperatursko polje pri rezanju

Generisana toplota koja je nastala pri rezanju dovodi do zagrevanja predmeta obrade, strugotine i alata i pojave karakterističnih temperaturnih polja i temperatura. Toplota se u zoni rezanja postepeno povećava dok se ne uspostavi ravnotežno stanje između nastale i odvedene toplote. Posle uspostavljanja ravnotežnog stanja nastaje tzv. kvazistacionarno toplotno polje (Kovač i Milikić, 1988). Toplotno polje se može smatrati ustaljenim samo u određenom vremenskom periodu. Eksperimentalnim putem je utvrđeno da uspostavljanje ravnotežnog stanja toplotnog polja traje oko 15 sekundi. Na slici 2.4 prikazano je temperatursko polje u zoni rezanja na leđnoj i grudnoj površini alata pri obradi čelika struganjem. Toplotna provodljivost kroz alat i predmet obrade izaziva pojavu izoterma na alatu.

Tokom procesa rezanja alat se haba, usled čega se menjaju uslovi deformacije i trenja između alata, obratka i strugotine, a time i toplotni izvori. Zbog toga se menja količina toplote pa se menja i temperatursko polje. Na samom vrhu alata temperatura nije najviša jer se vrh alata i leđna površina hlade preko obratka, jer u dodir sa alatom dolazi nova zapremina materijala koji se kreće suprotno od toka toplote.



Slika 2.4: Temperaturna polja pri obradi čelika struganjem (Nedić i Lazić, 2007)

U oba slučaja maksimana temperatura se nalazi na sredini kontakta između alata i strugotine. Temperatura bilo koje tačke u zoni rezanja zavisi od položaja tačke u odnosu na

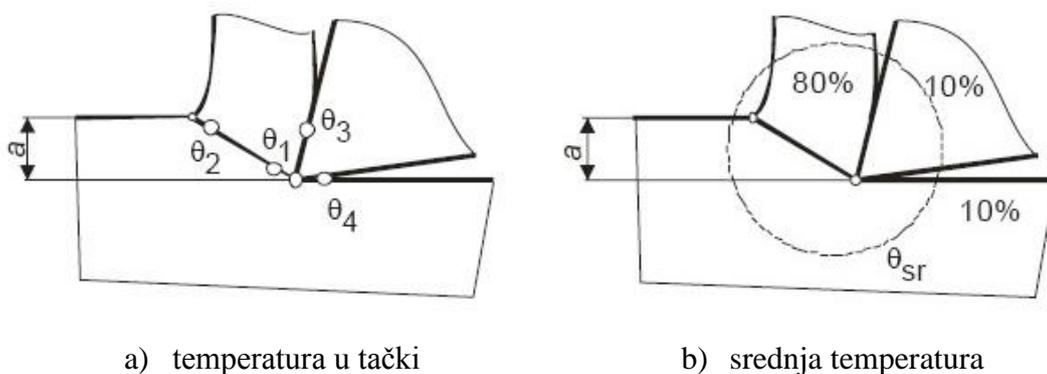
vrh reznog klina alata u kome se nalazi koordinatni početak sistema i vremena rezanja (Nedić i Lazić, 2007).

Pored temperature u bilo kojoj tački, za proučavanje procesa obrade rezanjem značajne su i:

- temperature u karakterističnim tačkama zone rezanja (slika 2.5a) i
- srednja temperatura rezanja (temperatura zone rezanja) (slika 2.5b).

U zoni rezanja mogu se izdvojiti četiri karakteristične temperaturske tačke (Urošević, 1984). To su:

- $\Theta_1$  - temperatura neposredno ispred vrha noža i to na mestu gde se javlja pukotina i gde se nalazi početni deo ravni smicanja. To je najviša temperatura u ravni smicanja. Ova temperatura raste s porastom brzine rezanja.
- $\Theta_2$  - je temperatura koja se javlja u ravni smicanja - u korenu strugotine. Ona je promenljiva i opada idući od  $\Theta_1$  ka spoljnoj površini, a posledica je deformisanja strugotine.
- $\Theta_3$  - je temperatura koja se javlja usled oslobađanja toplote pri trenju strugotine o grudnu površinu alata. Maksimalna vrednost ove temperature je na sredini dodira strugotine po grudnoj površini i u nekim slučajevima može da prekorači vrednost temperature  $\Theta_1$ .
- $\Theta_4$  - je temperatura koja nastaje usled trenja između ledne površine alata i obrađene površine na obratku.



Slika 2.5: Temperatura u karakterističnim tačkama i srednja temperatura rezanja (Nedić i Lazić, 2007)

### 2.3 Uticajni faktori na temperaturu rezanja

Temperature u zoni rezanja zavise od brojnih faktora kojima su definisani uslovi pod kojima se proces rezanja izvodi. S obzirom da srednja temperatura predstavlja srednju vrednost temperatura na kontaktnim površinama između alata, obratka i strugotine tj. odnosi se na kompletnu zonu rezanja, posmatraće se uticajni faktori na srednju temperaturu.

Na srednju temperaturu rezanja utiče veliki broj faktora kao što su parametri režima rezanja, materijal alata i obratka, korišćenje sredstva za hlađenje i podmazivanje, toplotna provodljivost reznog materijala kao i geometrija alata (Kovač i Milikić, 1988).

Parametri režima rezanja bitno utiču na srednju temperaturu rezanja. Sa povećanjem režima rezanja raste i srednja temperatura, jer se više mehaničke energije pretvara u toplotu. Najveći uticaj ima brzina rezanja, zatim korak pa dubina rezanja. Kod manjih brzina rezanja uticaj brzine je veći, a kod većih brzina manji, jer se većom brzinom povećava brzina strugotine, koja odvodi i najveću količinu toplote. Istraživanja pokazuju da temperatura dostiže maksimum i sa daljim povećanjem brzine temperatura opada, što stvara mogućnosti za tzv. visokobrzinske obrade.

Materijal alata i obratka utiču na temperaturu preko svojih toplotnih i mehaničkih osobina. Što je veća čvrstoća, žilavost i tvrdoća materijala veća je i temperatura rezanja. Pri obradi obojenih metala i livenog gvožđa temperatura je niža nego pri obradi čelika.

Na temperaturu rezanja uticaj ima i toplotna provodljivost reznog materijala. Sa povećanjem toplotne provodljivosti temperatura je niža. Pri obradi sa alatom od brzoreznog čelika niža je u odnosu na obradu sa tvrdim metalom. Za sniženje temperature rezanja pločica od tvrdog metala treba da je što manja, a toplotna provodljivost tela noža što veća.

Korišćenjem sredstva za hlađenje i podmazivanje temperatura rezanja opada. Sniženje temperature nije samo zbog odvođenja toplote već i zbog smanjenja trenja.

Geometrija alata u manjoj meri utiče na temperaturu rezanja nego režimi rezanja i materijal alata i obratka. Promenom geometrije reznog klina menja se udeo plastične deformacije u procesu rezanja, otpori rezanja i veličina kontakta alata, obratka i strugotine.

## **2.4 Pregled metoda merenja temperature rezanja**

Merenje temperature rezanja tokom obrade glodanjem je složeno zbog samog procesa obrade. Alat rotira velikom brzinom pri čemu nije u konstantnom zahvatu i prolazi kroz period grejanja i hlađenja u toku prekidnog rezanja. Veliki broj istraživača je radio na eksperimentalnom merenju i predviđanju temperature pri obradi glodanjem. U nastavku je dat pregled nekih od značajnijih radova.

Milikić (1980) u svojoj doktorskoj disertaciji prikazuje metode za merenje temperatura pri obradi rezanjem i mogućnosti njene tehnološke i senzorske primene pri definisanju mehaničkih i toplotnih karakteristika materijala alata i obratka.

Kovač (1987) u svojoj doktorskoj disertaciji daje rešenje za postupak merenja temperature zasnovan na principu termopara. Takođe, izvršena je analiza temperatura u različitim tačkama, tj mestima mernja, u procesu čeonog glodanja.

Ueda i dr. (2001) proračunali su ciklus zagrevanja na leđnoj površini reznog alata kod glodanja. Koristili su dvobojni optički pirometar kako bi izmerili temperaturu na leđnoj površini alata pri visokobrzinskom glodanju AISI 1045. Tehnika se sastojala od ubačenog optičkog vlakna u finom otvoru sa spoljne površine i povezane sa infracrvenim pirometrom. Ostala vlakna su postavljena oko alata i merena je temperatura u različitim intervalima nakon rezanja.

Ming i dr. (2003) su merili temperaturu na radnom predmetu infracrvenim termometrom i temperaturu alata termoparom tokom visokobrzinskog glodanja legure aluminijuma.

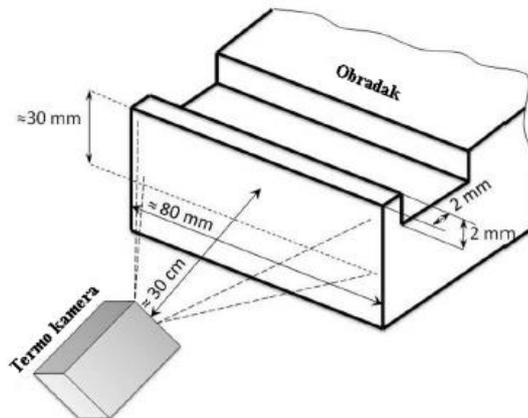
Prema Sutter i dr. (2003), infracrvena kamera može pokazati toplotnu tačku u neposrednoj blizini zone rezanja. Dubina ove tačke može da varira od 300 do 350  $\mu\text{m}$  na površini alat/obradak, što odgovara 2/3 polovne dubine reza. Njihov rad je pokazao da se temperatura povećava sa brzinom rezanja. Vrednost temperature od 82°C u zoni smicanja u

toku formiranja strugotine pokazala je ispravnost tehnike, koja ne zahteva složene kalibracije i da termoparovi budu ugrađeni u radnom komadu.

Chem (2006) u svom radu zaključuje da je infracrvena termografija jednostavna tehnika za korišćenje jer omogućava praćenje temperature u zoni rezanja i u složenijim procesima obrade. Termografijom se posredno može odrediti habanje alata, efikasnost procesa, kao i kvalitet proizvoda.

Brandao i dr. (2008) su predstavili eksperimentalnu i teorijsku studiju o toplotnom protoku pri obradi čeonim godanjem kaljenog čelika velikom brzinom. Temperatura je merena termoparom na radnom predmetu. Toplota prenet na radni predmet i prosečni koeficijent konvekcije sistema za hlađenje su evaluirani u cilju minimiziranja greške između teorijskih i eksperimentalnih rezultata.

Pittala i Monno (2010) su vršili eksperimentalna ispitivanja obrade čeonim glodanjem Ti6Al4V. Pri ispitivanju je korišćena glava za glodanje prečnika 28 mm sa pločicama od WC-Co. Merena je temperatura pomoću infracrvene termovizijske kamere FLIR ThermoCAM SC3000. Termo kamera je postavljena na udaljenosti od 30 cm od predmeta obrade i to unutar zaštitne kutije kako bi se izbeglo bilo kakvo oštećenje od strane strugotine (slika 2.6). Eksperiment je izveden bez hlađenja.



Slika 2.6: Šematski prikaz postavke eksperimenta (Pittala i Manno, 2010)

Sato i dr. (2011) u svom radu su pratili ciklus zagrevanja na grudnoj površini koristeći pirometar i optičko vlakno ubačeno na rotirajuće vretenasto glodalo.

Davoodi i Hosseinzadeh (2012) koriste infracrveni senzor za praćenje temperature obimnog glodanja. Prema autorima, infracrveni senzor mora biti instaliran što je moguće bliže željenoj mernoj površini. Rezultati su pokazali da su glavne prednosti: visok nivo osetljivosti kamere; sposobnost da se izmeri temperatura zone rezanja, pri čemu nisu potrebne rupe u alatu ili radnom komadu za instalaciju instrumenata; tehnika se može koristiti za sve vrste materijala. Stoga se može reći da infracrvena kamera omogućava praćenje temperature procesa obrade sa visokom tačnošću i pomaže u izboru parametara rezanja, materijala alata i prevlake. Metodologija je jednostavna za korišćenje jer se parametri pojavljuju na mapi boja sa temperaturnim opsegom bez sistema za konverziju ili analize indirektnih podataka.

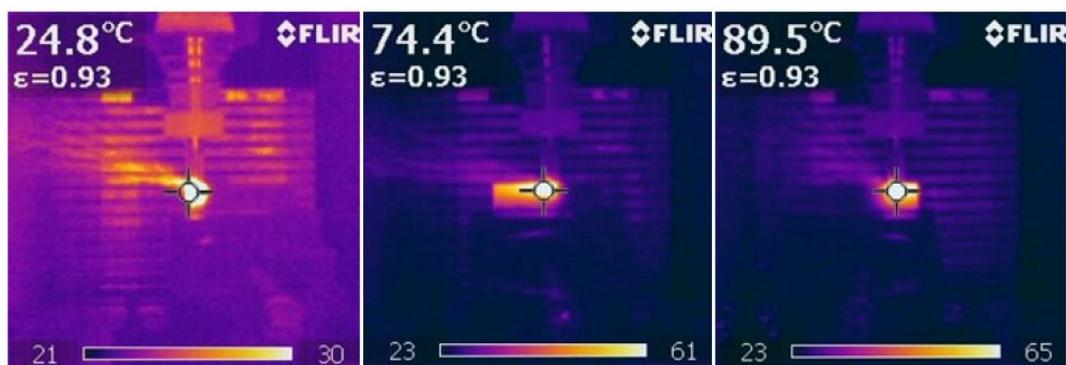
Zgorniak i Grdulska (2012), da bi odredili uticaj brzine rezanja na maksimalnu temperaturu koja se pojavljuje tokom procesa glodanja, vršili su merenja infracrvenom kamerom u zoni rezanja vretenastim glodalom legure magnezijuma AZ91HP (slika 2.7). Visoka temperatura nastala tokom procesa rezanja može da izazove rizik od paljenja strugotine kada je legura magnezijuma podvrgnuta procesu rezanja i nepovoljne pojave kao

što su gubitak tvrdoće i rezne sposobnosti alata. Autori smatraju da je u poslednjih nekoliko godina primena termografije za praćenje procesa obrade materijala rezanjem naglo porasla.



Slika 2.7: Termogram dobijen tokom obrade glodanja legure magnezijuma AZ91HP (Zgorniak i Grdulska, 2012)

Lauro i dr. (2013) u svom radu koriste infracrvenu kameru za snimanje temperature zone rezanja, omogućavajući praćenje temperature tokom procesa rezanja. Radni predmeti su obrađivani vretenastim glodalom bez rashladne tečnosti. Izvršen je izbor parametara obrade u cilju definisanja najuticajnijih parametara na smanjenje temperature tokom obrade glodanjem legure aluminijuma. Temperature su snimane na tri pozicije: na početku, sredini i kraju obratka u toku procesa obrade (slika 2.8). Osim toga, upotreba infracrvene kamere tokom obrade rezanjem je pokazala fleksibilnost i lako prikupljanje podataka.



a) Početak obratka

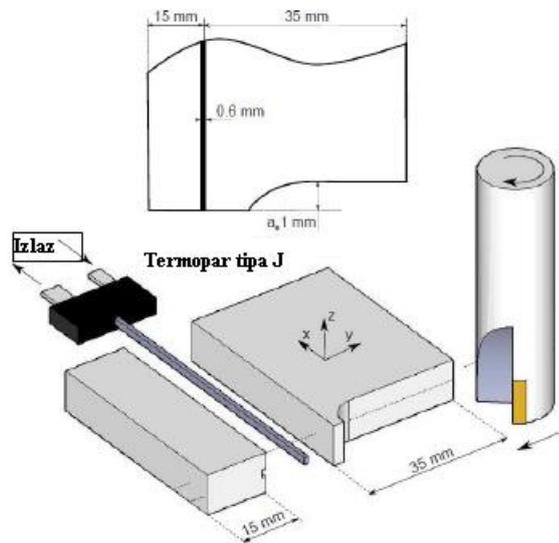
b) Sredina obratka

c) Kraj obratka

Slika 2.8: Primeri snimaka raspodele temperature na obratku (Lauro i dr., 2013)

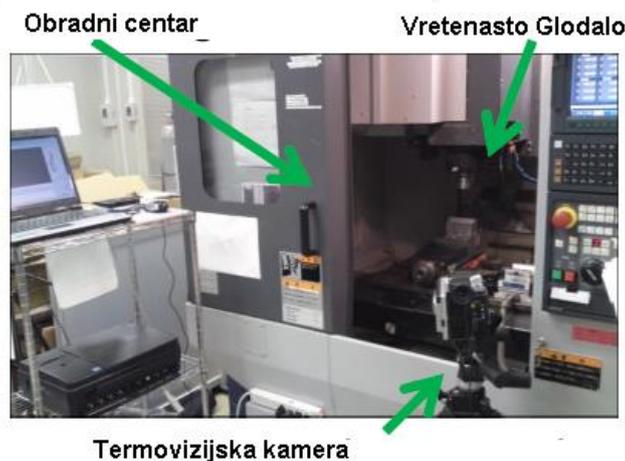
Le Coz i Dudzinski (2014) su istraživali temperaturu i temperaturski gradijent tokom obimnog glodanja Inconela 718 bez hlađenja. Korišćena je metoda termopara za merenje temperature obrađene površine i temperature u površinskom sloju. Ispitivan je i uticaj brzine rezanja na temperaturu i temperaturski gradijent. Izvedena su dva eksperimenta na osnovu metoda termopara. Prvi uređaj je merio temperaturu na 0,5 mm ispod nove generisane površine. Drugi uređaj merio je temperaturu obrađene površine i temperaturu rezne ivice

(slika 2.9). Zbog niske toplotne difuzije i visoke čvrstoće u procesu rezanja legure Inconela 718 generišu se visoke vrednosti temperature lokalizovane u zoni rezanja. Zbog toga se može uočiti veliki temperaturski gradijent od novonastale površine do potpovršine. Zaključeno je da je za obradu bez hlađenja teško obradivih materijala, temperatura rezanja važan parametar za optimizaciju procesa rezanja. Temperaturu treba meriti što je moguće bliže površini rezanja. Osim toga, bitno je znati temperaturske gradijente jer umeren nivo temperature rezne ivice i niski toplotni skok smanjuju habanje alata.



Slika 2.9: Šematski prikaz merenja temperature termoparom tipa J (Le Coz i Dudzinski, 2014)

Shindou i dr. (2015) u svom istraživanju vrše proces čeonog glodanja teško obradivog materijala JIS SUS310 i posmatraju ga sa infracrvenom termografijom visokih performansi (slika 2.10). S obzirom na rotaciju vretenastog glodala, istraživana je temperatura piksela u svakom frejmu da bi se dobila varijacija temperature posle rezanja svakog zuba alata u procesu čeonog glodanja. Raspodela temperature alata mogla je da se sa slika analizira na svakoj poziciji rotiranja alata u procesu glodanja, s obzirom na odnos između vremena trajanja svakog frejma i ugaone brzine glodala. Osim toga, može se videti da oblik držača alat i broj reznih zuba utiče na temperaturu rezanja jer su toplotni kapacitet alata i unos toplote drugačiji. Ispitivanje i analitički rezultati pokazuju da je ovaj metod bio dovoljno efikasan u proceni temperature alata u procesu čeonog glodanja.



Slika 2.10: Postavka termovizijske kamere (Shindou, 2015)

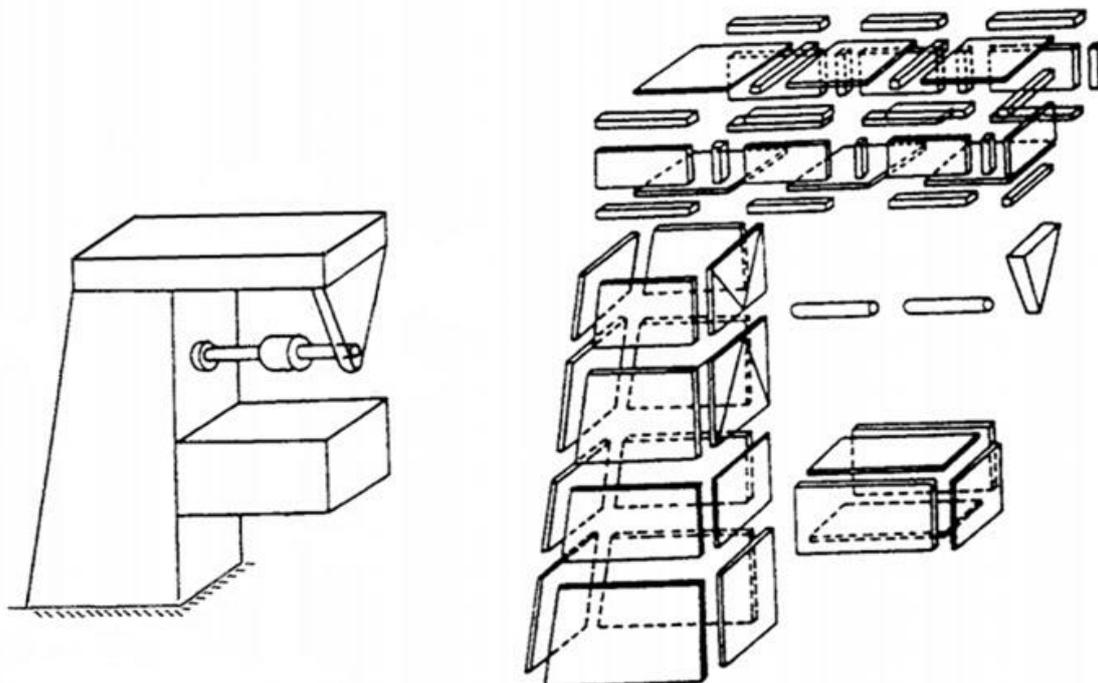
### 3 METODA KONAČNIH ELEMENATA

#### 3.1 Definicija metode konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata (MKE) je numerički postupak za približno rešavanje složenih inženjerskih problema. Osnovna ideja metode konačnih elemenata je da se pronade rešenje za komplikovane probleme zamenjujući ih jednostavnijim. Pošto je stvarni problem u pronalaženju rešenja zamenjen jednostavnijim, može se reći da je rešenje pre približno nego tačno (Rao, 2004).

Glavni razvoj metode konačnih elemenata je počeo krajem 1950-ih, uglavnom pokrenut aktivnostima u oblasti teorije konstrukcija. Međutim, mnogi od osnovnih principa su ranije razvijeni i potiču iz građevinarstva i primenjene matematike, kao i iz drugih disciplina (Messner, 2007).

U metodi konačnih elemenata, smatra se da je oblast rešenja izgrađena od velikog broja, međusobno povezanih podregiona koji se nazivaju konačni elementi. Kao primer kako bi model konačnih elemenata mogao da se koristi za predstavljanje kompleksnog geometrijskog oblika uzeta je struktura glodalice prikazana na slici 3.1.



Slika 3.1: Prikaz strukture glodalice metodom konačnih elemenata (Rao, 2004)

Konačni elementi su međusobno povezani tačkama na konturi elemenata koje se nazivaju čvorovi, a stanje u svakom elementu (pomaci, deformacije, naprezanja, temperatura, itd.) opisano je interpolacijskim funkcijama koje moraju zadovoljavati određene uslove da bi se diskretizovani model što više približio ponašanju kontinuiranog sistema. Najpre se izračunavaju karakteristične veličine u svakom konačnom elementu posebno (lokalno), a zatim se određenim transformacijama mogu izračunati za celu konstrukciju (globalno). Po pravilu, sa povećanjem broja konačnih elemenata (povećanjem gustine mreže konačnih elemenata) dobijeno rešenje je tačnije, naravno uz pravilnu formulaciju konačnih elemenata (Hubert i dr., 2001).

Kako je geometrija konačnih elemenata po pravilu jednostavna, to praktično znači da se realni kompleksni problem raščlanjuje na niz jednostavnih problema. Način diskretizacije, izbor oblika konačnog elementa, kao i izbor ukupnog broja konačnih elemenata, zavise od prirode problema koji se rešava i potrebne tačnosti željenog i traženog rešenja.

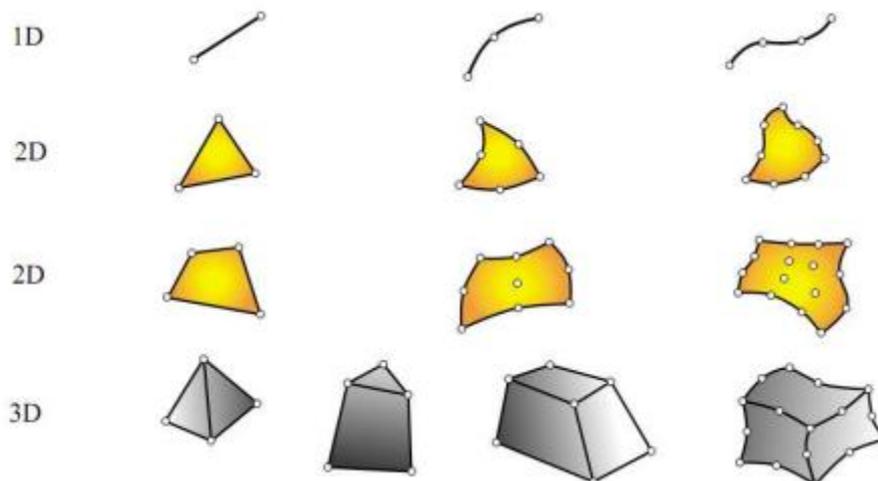
Na ovaj način se, analizom pojedinačnih elemenata, a uz pretpostavku o načinu njihove međusobne povezanosti, analizira celina problema. Ovaj pristup u analizi, gde se od posebnog ide ka opštem, od individualnog ka univerzalnom, u kom se analizom delova zaključuje o celini, poznati je induktivni pristup, koji se primenjuje u mnogim oblastima nauke. Kod inženjerskih i drugih problema kod kojih se opšta rešenja ne mogu dobiti u zatvorenom (direktnom, tačnom) obliku, induktivni pristup je od posebnog značaja.

### 3.2 Analiza pomoću metode konačnih elemenata

Analiza pomoću konačnih elemenata (Finite Element Analysis - FEA) je metoda zasnovana na računaru za simulaciju/analiziranje ponašanja inženjerskih konstrukcija i komponenti pod različitim uslovima. U opštem slučaju, analiza pomoću konačnih elemenata sadrži sledeće glavne korake (Nikishkov, 2004):

#### 1. Diskretizacija kontinuuma (prostora)

Diskretizacija modela je prvi korak u pripremi računarske simulacije u metodi konačnih elemenata. Po pravilu je potrebno model s neograničenim brojem stepeni slobode zameniti s modelom koji će imati konačan broj elemenata, a samim tim i stepeni slobode. Pri tome treba paziti da se oblik, veličina, broj i vrsta elemenata odabere na taj način da što verodostojnije opisuje geometriju modela. Vrsta elemenata se određuje zavisno od vrste problema i mogu se podeliti u tri grupe: jednodimenzijски konačni elementi, dvodimenzijски konačni elementi, trodimenzijски konačni elementi (slika 3.2).



Slika 3.2: Tipični geometrijski oblici konačnih elemenata (Boeraeve, 2010)

#### 2. Izbor funkcija interpolacije

Sledeći korak je da se odrede čvorovi u svakom elementu, a zatim izabere funkcija interpolacije. Prostorna promenljiva može biti skalar, vektor ili tenzor višeg reda. Često su polinomi izabrani kao interpolacione funkcije za prostorno promenljivu jer se lako integrišu i diferenciraju. Stepenn izabranog polinoma zavisi od broja čvorova koji su dodeljeni elementu, prirode i broja nepoznatih u svakom čvoru i određenih uslova kontinuiteta na čvorovima i duž granica elemenata.

### *3. Određivanje svojstva elemenata*

Nakon diskretizacije modela i izbora interpolacionih funkcija, treba da se utvrde svojstva elemenata. Ona opisuju ponašanje elemenata sa fizičke tačke gledišta. Drugim rečima, svojstva elemenata predstavljaju vezu između primarnih nepoznatih (npr. pomeranje elemenata) i sekundarnih nepoznatih sistema (npr. napona). U cilju dobijanja svojstva elementa, različiti pristupi se mogu uzeti, a najčešći je varijacioni pristup (Messner, 2007).

### *4. Formiranje matričnih jednačina elemenata*

U cilju pronalaženja svojstva celokupnog sistema predstavljenog elementima, matrične jednačine elemenata se kombinuju tako da formiraju matrične jednačine sistema. Postupak sastavljanja matričnih jednačina elemenata se oslanja na činjenicu da promenljive u čvornim mestima susednih elemenata imaju istu vrednost. Pre rešenja, granični uslovi (koji se ne evidentiraju u jednačinama elemenata) trebalo bi da budu određeni.

### *5. Rešavanje matričnih jednačina sistema*

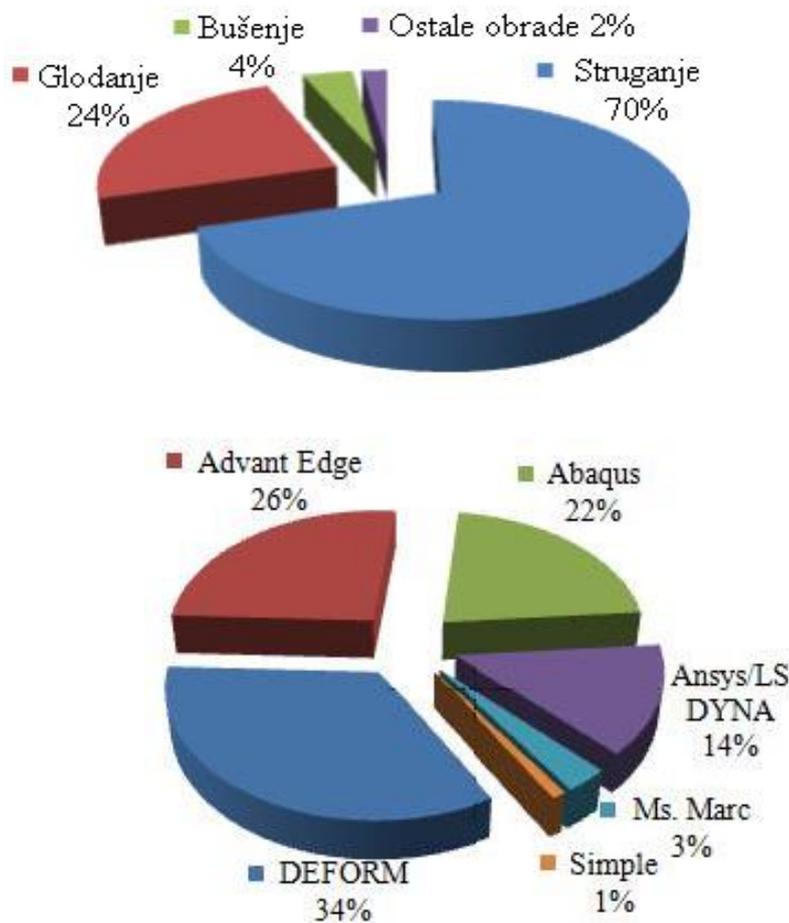
Skup simultanih jednačina dobijenih procesom spajanja matričnih jednačina elemenata je rešen numerički u cilju dobijanja prostorno promenljive. Ovaj proces podrazumeva primenu numeričkih integracionih procedura koje zahtevaju rešavanje integrala u diskretnim tačkama unutar elementa, tzv. integracionim tačkama (Messner, 2007).

## **3.3 Metoda konačnih elemenata u obradi metala rezanjem**

Razvoj računara omogućio je uvođenje metode konačnih elemenata u svakodnevnu inženjersku praksu i izbegavanje ručnog računanja. Metoda konačnih elemenata ne bi se mogla primenjivati bez današnjih računara koji omogućavaju rešavanje velikih sistema jednačina. Osim skraćivanja vremena potrebnog za izradu proračuna, primenom metode konačnih elemenata moguće je u vrlo kratkom roku analizirati i veliki broj eksperimenata, što omogućuje dodatnu uštedu vremena, ali i izradu bolje optimizovanih procesa u obradi metala rezanjem.

Istraživači obrade metala rezanjem fokusiraju se na određivanje parametara obrade i geometrije alata za efikasnost procesa. Za postizanje dobrih rezultata u istraživanjima potrebni su eksperimenti, ali su oni skupi i dugotrajni. Za kompleksne procese obrade rezanjem pojednostavljene analitičke metode imaju ograničene aplikacije i ne mogu se koristiti. Ubrzo nakon što se metoda konačnih elemenata pojavila, istraživači su počeli da koriste ovu metodu za analizu procesa obrade. U poslednje dve decenije, metoda konačnih elemenata postaje najčešće korišćen metod u analizi obrade metala rezanjem. Na slici 3.3 dat je grafički pregled najizučavanijih procesa obrade rezanjem i najčešće korišćenih programskih paketa za simulaciju procesa obrade rezanjem metodom konačnih elemenata na osnovu 116 naučnih radova objavljenih tokom 2000-2014. godine (Bontiu Pop i Lobontiu, 2015).

Različiti izlazni rezultati i karakteristike procesa obrade metala rezanjem, kao što su na primer napon, temperatura i oblik strugotine, mogu se predvideti pomoću metode konačnih elemenata bez eksperimenta.



Slika 3.3: Pregled istraživačkih aktivnosti procesa obrade rezanjem u području simulacija metodom konačnih elemenata (Bontiu Pop i Lobontiu, 2015)

### 3.4 Konstitutivni modeli radnog materijala

Jedna od najbitnijih tema u simulaciji obrade rezanjem je modeliranje toka naprezanja obratka na pravi način. U procesu rezanja metala materijal je izložen učestanim elasto-plastičnim deformacijama pri ekstremnim uslovima. Kako bi se dobili odgovarajući rezultati model materijala koji se koristi u procesu simulacije mora biti u stanju da opiše na pravi način ponašanje u procesu deformacije, kao što je povećanje ili smanjenje tvrdoće materijala usled velikog raspona naprezanja, različitog intenziteta naprezanja i temperature (Wedberg, 2013).

U literaturi se može sresti više različitih modela radnog materijala a u radu su opisani Oxley, Johnson-Cook i Zerilli i Armstrong model materijala.

#### 3.4.1 Oxley model materijala

Oxley (1990) i njegovi saradnici iskoristili su zakon snage kako bi predstavili tok naprezanja kod ugljeničnih čelika kao:

$$\sigma = \sigma_1 \varepsilon^n \quad (3.1)$$

gde su  $\sigma$  i  $\varepsilon$  tok naprezanja i deformacija, a  $\sigma_1$  je tok naprezanja kada je vrednost  $\varepsilon=1.0$  i kada je  $n$  eksponent povećanja tvrdoće usled deformacije.  $\sigma_1$  i  $n$  zavise od temperature nastale u zavisnosti od brzine ( $\Theta_{mod}$ ) date od strane McGregora i Fishera.  $\Theta_{mod}$  se definiše kao:

$$\Theta_{mod} = \theta \left(1 - v \log \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \quad (3.2)$$

gde su  $v$  i  $\dot{\varepsilon}_0$  konstante materijala obrade i na primer imaju vrednosti 0,09 i 0,1 za ugljenične čelike.

### 3.4.2 Johnson-Cook model materijala

Johnson-Cook konstitutivni model materijala implementira povećanje tvrdoće usled izotropskih promena i uobičajen je pri opisivanju termo-visoko-plastičnog ponašanja radnog komada u procesu rezanja (Arrazola i dr., 2014). Da bi se dobili svi neophodni podaci za postavljanje parametara materijala bilo je neophodno izvršiti torzione testove za različite nivoe naprezanja, testove na statičko istezanje i dinamički Hopkinsonov test na istezanje (Proudian, 2012). Dijagram naprezanja je formulisan kao funkcija koju čine deformacija, nivo naprezanja i temperatura, kao što se može i videti u jednačini (3.3). Johnson-Cook jednačina glasi:

$$\bar{\sigma} = (A + B(\bar{\varepsilon}^{pl})^n) \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right] (1 - \hat{\theta}^m) \quad (3.3)$$

gde je  $\bar{\sigma}$  tok naprezanja,  $A$  tvrdoća materijala na početku obrade,  $\bar{\varepsilon}^{pl}$  je plastična deformacija i  $\dot{\varepsilon}^{pl}$  je stepen plastične deformacije koji je normalizovan sa referentnim stepenom naprezanja  $\dot{\varepsilon}_0$ .  $B$ ,  $n$ ,  $C$  i  $m$  su parametri modela materijala a  $\hat{\theta}$  je homologna temperatura data jednačinom (3.4).

$$\hat{\theta} = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_m - \theta_r)} \quad (3.4)$$

gde je  $\theta$  trenutna temperatura radnog komada,  $\theta_r$  je sobna temperatura i  $\theta_m$  je temperatura topljenja materijala. Johnson-Cook model se može gledati kao množenje tri karakteristična pojma:

$$\sigma = f(\varepsilon)g(\dot{\varepsilon}^{pl})h(\theta) \quad (3.5)$$

gde je

$$f(\varepsilon) = A + B(\bar{\varepsilon}^{pl})^n \quad (3.6)$$

$$g(\dot{\varepsilon}^{pl}) = 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (3.7)$$

$$h(\theta) = 1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_m - \theta_r}\right)^m \quad (3.8)$$

Jednačina (3.6) opisuje ponašanje izazvano povećanjem tvrdoće usled izotropskih naprezanja, jednačina (3.7) opisuje osetljivost na stepen naprezanja i jednačina (3.8) opisuje smanjenje tvrdoće pod uticajem temperature. Johnson-Cook model je kritikovan zbog zanemarivanja efekata koji nastaju usled nagomilavanja naprezanja, stepena naprezanja i temperature. Još jedan nedostatak je nemogućnost da beleži ponašanja tokom visokog naprezanja i visoke stope naprezanja (na primer tok smanjenja tvrdoće materijala).

### 3.4.3 Zerilli i Armstrong model materijala

Zerilli i Armstrong (1988) razvili su dve mikro strukturalno bazirane konstitutivne jednačine. Oni su radili na metalima sa površinski unutrašnje centriranim rešetkama kako bi analizirali njihove temperature i ponašanje pri visokom stepenu naprezanja i na taj način uočili značajne razlike između ovih materijala. Zbog toga oni su razvili dva karakteristična

modela. Ustanovljena jednačina za metale sa unutrašnje centriranim rešetkama može se napisati na sledeći način:

$$\sigma = C_0 + C_1 \exp\left(-C_3 T + C_4 T \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) + C_5 \epsilon^n \quad (3.9)$$

Dijagram napreznja za metale sa površinski centriranim rešetkama je definisan kao:

$$\sigma = C_0 + C_2 \epsilon^{-1/2} \exp\left(-C_3 T + C_4 T \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \quad (3.10)$$

U ovim jednačinama  $C_0$  je komponenta napreznja koja se računa za promenu gustine dijagrama napreznja,  $C_1$ - $C_5$ ,  $n$  su konstante materijala i  $T$  je apsolutna temperatura. U jednačini 3.9, pretpostavlja se da na zavisnost deformacije od toka napreznja ne utiče stepen deformacije i temperatura dok je u jednačini 3.10 obrnuto.

### 3.5 Modeli trenja

Izbor modela trenja ima veliki uticaj na predviđanje habanja alata jer utiče na toplotu proizvedenu u kontaktnoj zoni i nominalne napone između alata i radnog komada. Nekoliko različitih modela trenja je predloženo od strane istraživača. Važno je napomenuti da mehanizmi koji stoje iza problema trenja još uvek nisu u potpunosti razumljivi (Agmell i dr., 2013) i izbor modela trenja je stoga često vođen željom za jednostavnošću.

#### 3.5.1 Coulomb-ov model trenja

Coulomb-ov model trenja je veoma jednostavan i klasičan model trenja. Kod prvih simulacija obrade rezanjem ovaj model je korišćen na celoj kontaktnoj zoni sa konstantnim koeficijentom trenja. Kao što se može videti u jednačini (3.11), napon usled trenja je proporcionalan nominalnom naponu i koeficijentu trenja.

$$\tau = \mu \sigma_n \quad (3.11)$$

#### 3.5.2 Model smicanja

U modelu smicanja pretpostavlja se da je napon trenja na grudnoj površini alata konstantan i zanemarene su male varijacije napona  $\tau$  i  $\sigma_n$ . Ovo se može izraziti putem sledeće formule:

$$\tau = mk \quad (3.12)$$

gde je  $m$  faktor trenja, a  $k$  napon tečenja radnog materijala.

### 3.6 Definisane graničnih uslova simulacije

Tri glavne formulacije graničnih uslova koje se koriste u simulacijama procesa rezanja metala metodom konačnih elemenata su: Lagranžova, Ojlerova i Arbitražna Lagranž-Ojlerova (ALE).

#### 3.6.1 Lagranžov model

Lagranžova formulacija je uglavnom korišćena kod mehaničkih problema vezanih za solide (čvrste elemente). Ovde je mreža konačnih elemenata postavljena na materijal obratka i mreža se deformiše u vremenu sa materijalom. Lagranžova formula je široko primenjena u simulacijama rezanja metala zbog mogućnosti da odredi geometriju strugotine od početne faze do stabilnog stanja i ova geometrija je funkcija parametara rezanja, procesa plastične

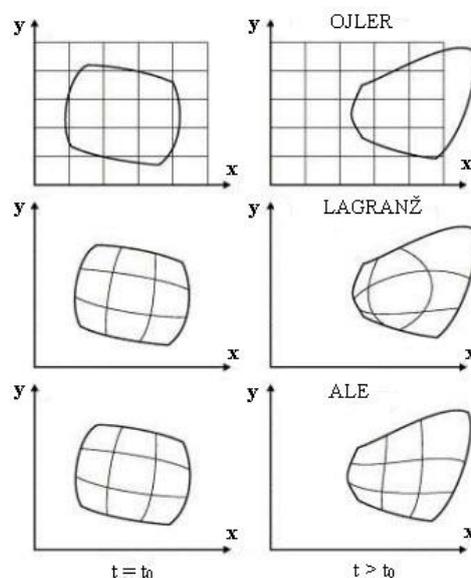
deformacije i karakteristika materijala i zbog toga se granice i oblici strugotine ne moraju znati odmah. Pored toga, kriterijum odvajanja strugotine može se definisati da simulira rezanu strugotinu ili lomove materijala u metalu obratka koji su bazirani na Lagranžovim formulacijama. Iako postoje mnoge prednosti Lagranžovog formulisanja, isto tako postoje i nedostaci. Metal koji se reže izložen je ozbiljnim plastičnim deformacijama i to izaziva distorziju elemenata. Zbog toga je neophodna regeneracija mreže i mora da se obezbediti kriterijum za odvajanje strugotine. Ovaj nedostatak formulacije može se eliminisati korišćenjem ažurirane Lagranžove formulacije sa adaptacijom mreže ili tehnikom automatske promene mreže.

### 3.6.2 Ojlerov model

U Ojlerovoj formulaciji mreža konačnih elemenata je prostorno fiksirana, a materijal prolazi kroz kontrolu zapremine koja eliminiše distorziju tokom samog procesa. Osim toga, manje elemenata potrebnih za analizu skraćuje vreme proračuna. Rezanje je simulirano iz stanja mirovanja pa prema tome nema potrebe za kriterijumom razdvajanja kod modela baziranih na Ojleru. Nedostatak Ojlerove formulacije je to što je potrebno određivanje granica i oblika strugotine pre simulacije. Isto tako debljina strugotine, dužina kontakta između alata i strugotine i uslovi koji se javljaju prilikom kontakta strugotine i alata moraju biti konstantni tokom analize, što Ojlerovu formulaciju čini neodgovarajućom kada su u pitanju realni uslovi koji se javljaju u procesu rezanja metala.

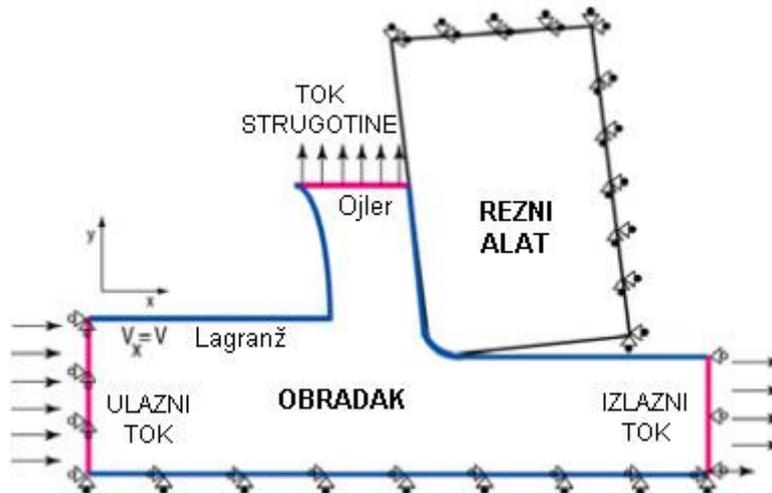
### 3.6.3 Arbitražni Lagranž-Ojlerov model (ALE)

Veliki problem kada se simulira obrada rezanjem metodom konačnih elemenata je da se javlja velika distorzija mreže što izaziva prekid simulacije. Da bi se rešio ovaj problem uobičajeno je da se koristi prilagodljiva Arbitražna Lagranž-Ojlerova (ALE) formulacija mreže. U ALE formulaciji mreža konačnih elemenata nije spojena ni prostorno a ni za materijal radnog predmeta. Mreža prati tok materijala i problemi vezani za izmeštanje su rešeni u Lagranžovom koraku, dok se mreža repositionira i problem za brzine rešen je u Ojlerovom koraku. Na slici 3.4 prikazane su Ojlerova, Lagranžova i ALE formulacija graničnih uslova simulacije.



Slika 3.4: Prikaz Ojlerove, Lagranžove i ALE formulacije graničnih uslova simulacije (Proudian, 2012)

U simulaciji rezanja metala težilo se da se iskoristi Ojlerov pristup za modeliranje oblasti oko vrha alata gde se sam proces rezanja javlja. Na taj način izbegnute su ozbiljne distorzije bez potrebe za ponovnim ažuriranjem mreže. Lagranžov pristup je iskorišćen za nesmetan tok materijala na slobodnim granicama. Štaviše, oblik strugotine se javlja kao funkcija plastične deformacije materijala. Ovaj pristup je prikazan na slici 3.5.



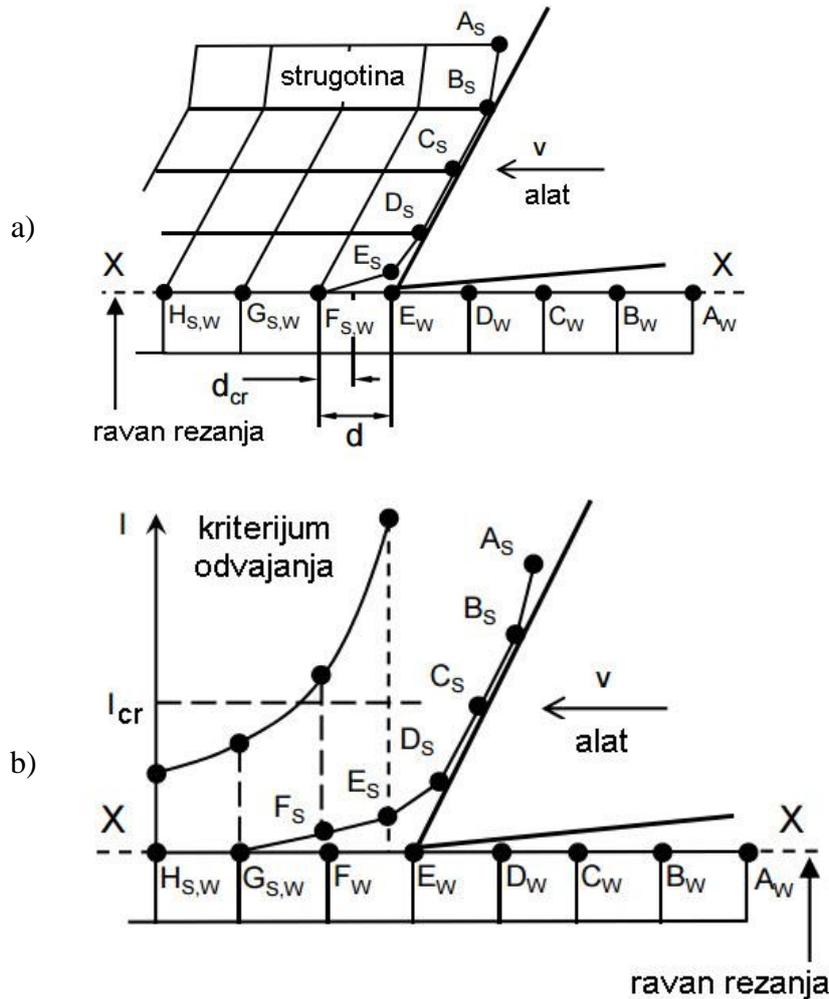
Slika 3.5: Ojlerovi i Lagranžovi granični uslovi u ALE simulaciji (Ozel i Zeren, 2007)

ALE prilagodljiva mreža je metod sa korišćenjem jedne mreže. To znači da su pozicije čvorova u originalnoj mreži ispravljene određenim algoritmom umesto da se ponovo postavlja nova mreža. Postoje dva glavna koraka kada je reč o ALE prilagodljivoj mreži: promena lokacije čvorova kako bi se stvorila novoformirana mreža (takozvana procedura za ažuriranje mreže) i ponovno mapiranje promenljivih koje čine rešenje za ovu novoformiranu mrežu (takozvana procedura za ažuriranje naprežavanja).

### 3.7 Kriterijumi formiranja strugotine

U realnim procesima obrade rezanjem formira se povezana ili izlomljena strugotina. Postoje brojni kriterijumi za predviđanje forme strugotine u numeričkim metodama koji se mogu grupisati kao geometrijski ili fizički kriterijum. Geometrijski kriterijum definiše stugotinu duž unapred definisane linije razdvajanja, dok se u fizičkom kriterijumu koristi kontinuirano umrežavanje koje se zasniva na velikoj plastičnoj deformaciji.

Prema geometrijskom kriterijumu formiranja strugotine je počelo kada vrh alata prilazi čvoru duž linije razdvajanja unutar kritičnog rastojanja. Onda je taj čvor odvojen od radnog predmeta i postaje deo strugotine. Ovaj proces se može videti detaljno u slici 3.6.a. Kada rastojanje  $d$  između vrha alata i čvora  $E$  postane jednako ili manje od kritičnog rastojanja  $d_{cr}$ , javljaju se novi čvor  $E_w$ . Tada se čvor  $E_s$  kreće na gore duž  $E_s A_s$  na maloj udaljenosti, a dok se čvor  $E_w$  pomera na dole na maloj udaljenosti duž  $E_w A_w$ . Kritična vrednost rastojanja izabrana je proizvoljno i zbog toga se može reći da ovaj kriterijum ne pokazuje realan mehanizam formiranja strugotine, ali se s druge strane može lako kontrolisati.



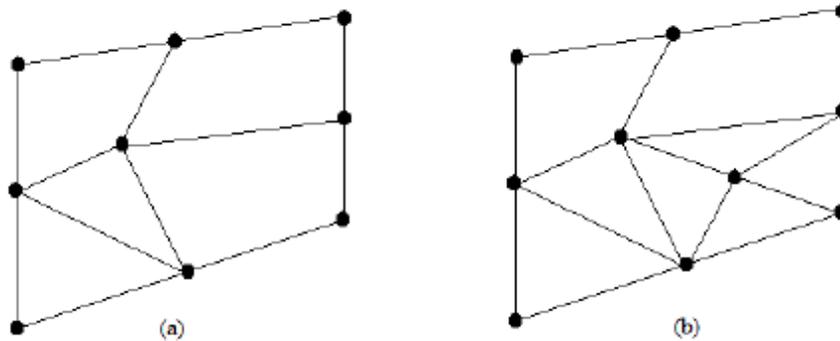
Slika 3.6: Formiranje strugotine bazirano na: a) rastojanju čvorova b) kritičnom indikatoru (Klocke, 2013)

Prema fizičkom kriterijumu razdvajanje čvorova se javlja kada je dostignuta unapred definisana kritična vrednost fizičkog parametara u čvoru. Kao kritični fizički parametar može biti izabran napon ili deformacija u zavisnosti od svojstava radnog materijala i parametara rezanja. U ovom slučaju strugotina se formira kada na čvoru  $E_s$  najbliže samom vrhu dostigne kritičnu vrednost  $E_{scr}$ . Ovaj kriterijum je često kritikovan zbog činjenice da je izdvajanje čvora brže od brzine rezanja i formira veliku otvorenu pukotinu ispred alata vrha. Proces je ilustrovan na slici 3.6 (b) u kojoj indikator izdvajanja strugotine  $I_{cr}$  predstavlja ekvivalentne plastične deformacije. Osim toga utvrđeno je da vrednost  $E_{scr}$  utiče na veličinu zaostalih napona (Vaz, 2000).

### 3.8 Definisane mreže konačnih elementa

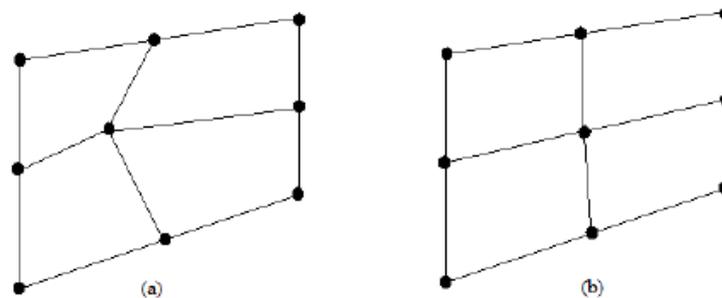
U metodi konačnih elemenata kontinualna oblast je podeljena na diskretnu oblast nazvanu elementi. Početno kreirana mreža metodom konačnih elemenata ne može da zadrži svoj originalni oblik i krivi se (izvija se, iskreće se) usled ozbiljnih plastičnih deformacija tokom rezanja metala. Distorzija izaziva konvergenciju i numeričke greške. Kako bi se rešili ovi problemi mora se generisati nova mreža, što znači da se menja njena veličina i raspored. Ovo se zove procedura prilagođavanja mreže. Jedna od ovih procedura je tehnika ponovnog

formiranja mreže i uključuje generisanje kompletno nove mreže iz već postojeće iskrivljene mreže. Druga se zove tehnika formiranja finije mreže (refinement) koja se bazira na povećanju gustine lokalne mreže redukujući veličine lokalnih elemenata, kao što se vidi na slici 3.7.



Slika 3.7: Prefinjena: (a) početna lokalna mreža, (b) redukovanje veličine elementa

Poslednja procedura prilagođavanja mreže je umekšavanje koja uključuje promenu pozicije čvorova kako bi se omogućili bolji oblici elemenata, kao što se vidi na slici 3.8.



Slika 3.8: Umekšavanje: (a) početna lokalna mreža, (b) premeštanje čvorova

Procedura prilagođavanja mreže smanjuje greške u proračunima pri traženju rešenja, pa samim tim povećava tačnost simulacije. Iz ovih razloga procedura prilagođavanja mreže mora biti korišćena u simulacijama metodom konačnih elemenata uključujući i ozbiljne plastične deformacije koje se javljaju u procesu rezanja metala.

Za modeliranje procesa obrade rezanjem koriste se različiti programski paketi. U nastavku rada biće detaljnije opisana dva programska paketa.

### 3.8.1 Programski paket ANSYS

ANSYS (*AN*alysis *SY*stem) je programski paket opšte namene razvijen 1970-te godine za proračun uz pomoć metode konačnih elemenata, koji poseduje različite mogućnosti analiziranja od jednostavnih linearnih-statičkih analiza, do kompleksnih nelinearnih-dinamičkih analiza. Koristi se za rešavanje problema iz različitih oblasti kao što su teorija konstrukcija, elektromagnetizam, provođenje toplote, akustika, mehanika fluida ili kombinacija ovih oblasti.

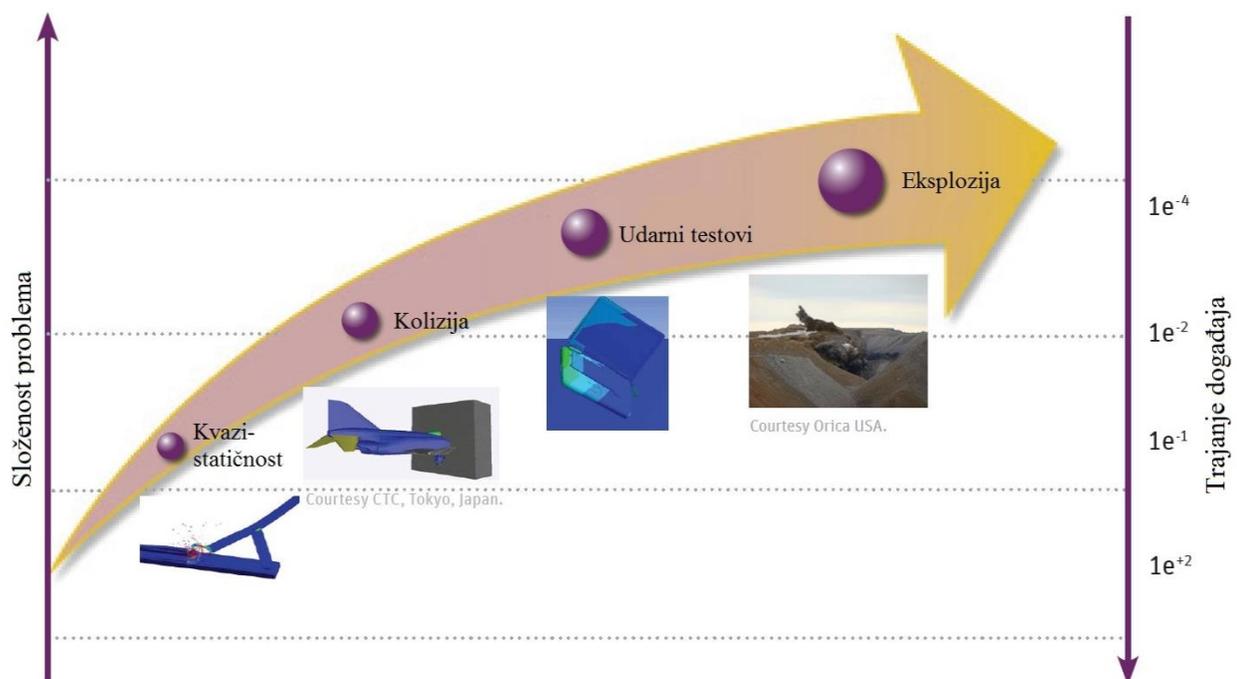
Analiza u ovom programskom paketu sastoji se iz tri glavna koraka (slika 3.9):

- pretprocesiranje (definisanje i oblikovanje modela)

- procesiranje (primena opterećenja i dobijanje rezultata)
- postprocesiranje (analiza dobijenih rezultata).

ANSYS je posvećen isključivo razvoju softvera za inženjerske simulacije koji podstiče brz i inovativan dizajn proizvoda. Da bi osigurali uspešan proizvod inženjeri moraju precizno da predvide kako će se kompleksni proizvodi ponašati u realnom svetu. Modul ANSYS *Explicit Dynamics* omogućava korisnicima da zadovolje zahteve rešenja različitih složenosti zasnovanih na detaljima problema i stručnosti korisnika (ANSYS, 2016). Ovaj modul pruža vrhunsku funkcionalnost-dubinu, širinu, mnoštvo naprednih mogućnosti i integrisanu multifiziku dajući poverenje u rezultate simulacija koje odgovaraju realnosti. Sveobuhvatnim opsegom rešenja obezbeđuje se pristup u skoro sve oblasti inženjerskih simulacija koje zahtevaju procesi modelovanja i konstruisanja. Proračuni koji se rade velikim brzinama omogućavaju kreiranje modela visoke verodostojnosti u koje se može imati tačan i detaljan uvid.

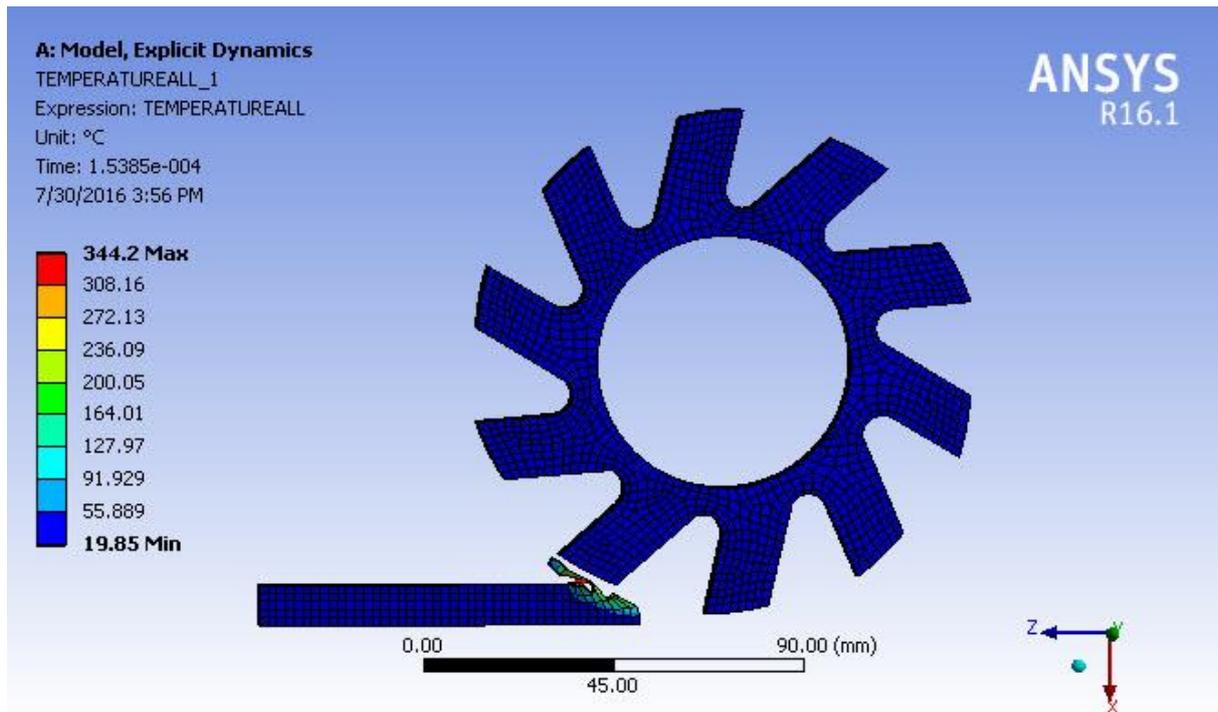
Preciznost kod *Explicit Dynamics-a* je u osnovi funkcija veličine elementa. Generalno posmatrano, što je manji element to su precizniji rezultati, ali to zahteva i više vremena da se urade proračuni. ANSYS tehnika proračuna velikim brzinama omogućava da se poveća preciznost, kao i da se ispita više dizajna odjednom u isto vreme. Smanjivanje vremena potrebnog za proračun dovodi do boljih i optimizovanijih rezultata. Visoko kvalitetna mreža je kritičan zahtev kada je potrebna efikasna, precizna i eksplicitna analiza. Zahvaljujući integraciji sa okruženjem ANSYS *Workbench* omogućeno je automatsko generisanje mreže. Neke geometrije, naročito one koje su posebno napravljene za proizvođače i importovane iz CAD podataka su previše složene da bi bile obrisane kako bi moglo da se napravi puna heksagonalna mreža.



Slika 3.9: Odnos složenosti problema i trajanja događaja (ANSYS, 2016)

Sa ANSYS specijalnom tetraedarskom formulacijom elemenata koja se naziva deformacija bazirana na čvorovima, eliminiše se efekat smicanja, koji predstavlja problem sa kojim se susreću tradicionalni tetraedarski elementi. Precizni tetraedarski elementi omogućavaju lako kreiranje radnih mreža koje mogu da predstavljaju složene geometrije. Na slici

3.10 prikazana je visokokvalitetna mreža generisana u ANSYS Workbench-u korišćenjem automatske više zonske metode (ANSYS, 2016).



Slika 3.10: Automatsko kreiranje visokokvalitetne mreže

U mnogo slučajeva preciznost jednog eksplicitnog rešenja može biti proverena samo poređenjem sa fizičkim eksperimentima. Zahvaljujući ANSYS-u korisnici širom sveta mogu se osloniti na preciznost eksplicitnih rezultata.

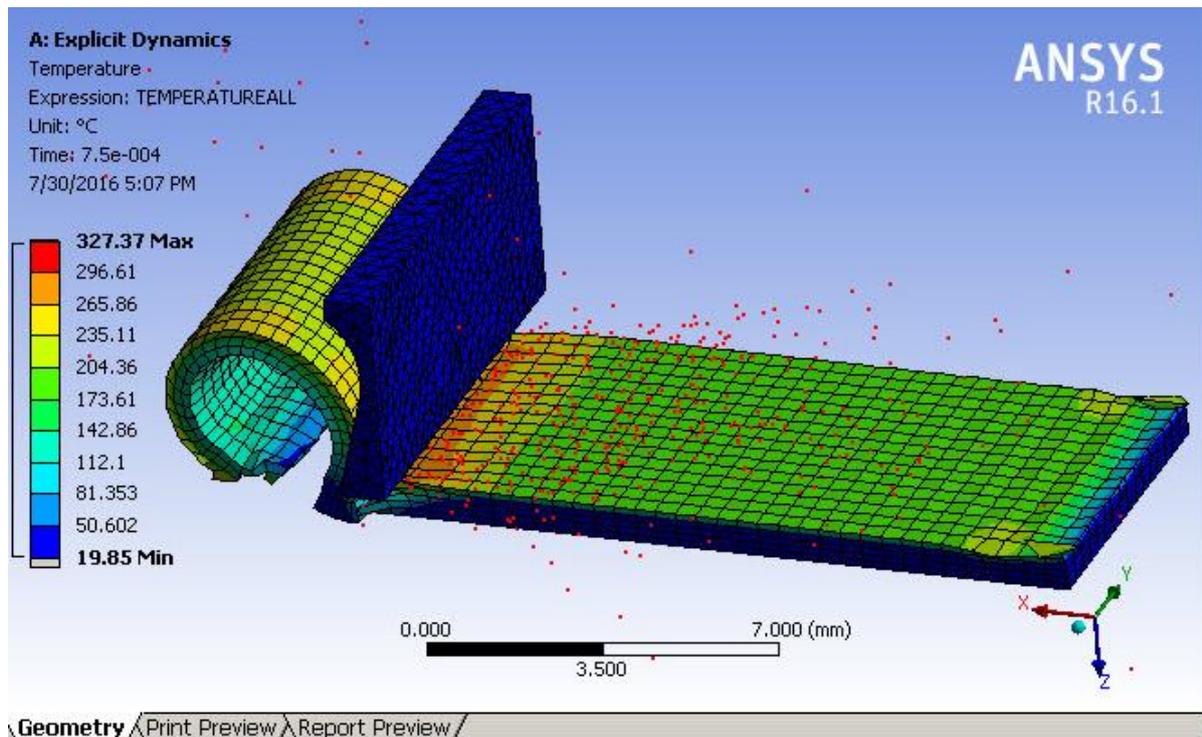
U ANSYS *Explicit Dynamics*-u Lagranžov model formulacije mreže se najčešće koristi za rešavanje i on je najbrži proračunski metod da bi se predstavila struktura. On je najbolje prilagođen za praćenje udarnih talasa i udarnih pritisaka. U okviru svakog elementa Lagranžovim modelom pronalazi se lokacija materijala u diskretizovanom modelu i prati njegova deformacija. Ojlerov model prati tok materijala kroz određenu oblast predstavljajući ga kao fiksiranu mrežu. On je idealan za modeliranje velikih deformacija čvrstih tela, kao i tokove tečnosti i gasova. Upotrebom ANSYS *Virtual Euler solver-a* mreža se automatski generiše bez korisnikovog unosa parametara.

Arbitražni Lagranž-Ojlerov (ALE) model kombinuje prednosti Lagranžovog i Ojlerovog metoda i u isto vreme eliminiše neke njihove nedostatke. On je idealan za simuliranje materijala sa velikim deformacijama u kojima je poželjno da se vidi reakcija na udare visoke rezolucije. Mogu se kombinovati Lagranžov, Ojlerov i ALE model u jedinstven problem kako bi se predstavili najefikasniji i najtačniji mogući rezultati.

Inženjeri koji rade na simulacijama (ExpertFEA, 2016), naročito oni koji rade eksplicitne dinamičke analize, generišu velike količine podataka koje je potrebno arhivirati u formatu koji može da se pretražuje. ANSYS *Engineering Knowledge Manager* omogućava registrovanje i snimanje podataka simulacije zajedno sa procesima rada. Ovaj alat može da poveća efikasnost simulacije i produktivnost. ANSYS *DesignModeler* daje mogućnost modelovanja i kreiranja geometrija za eksplicitne analize. Celokupan ANSYS paket je nezavisan od CAD i omogućava uvoz podataka iz različitih izvora. Moderni CAD programski paketi kreiraju geometrije koje su precizne kao u realnosti. Većina CAD geometrijskih modela kreirana za proizvodne potrebe (ali ne i za analize) često imaju preklapanja površina,

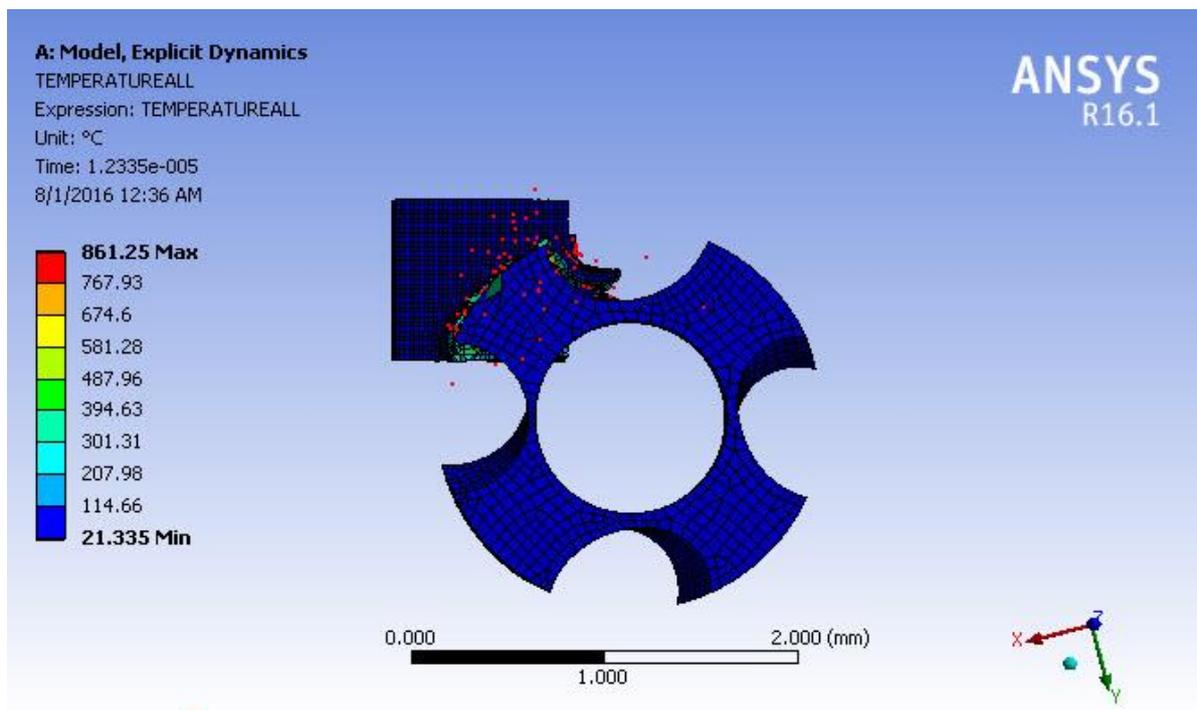
praznine i druge oblike netačnih formi koje ANSYS predprocesni alat čisti, koriguje i smanjuje CAD kompleksnost i na taj način omogućava da se poveća preciznost i brzina.

Na slici 3.11 može se videti primer simulacije obrade rezanjem u modulu *Explicit Dynamics*.



Slika 3.11: Simulacija obrade rezanjem u modulu *Explicit Dynamics* (ExpertFEA, 2016)

Na slici 3.12 može se videti primer simulacije obrade glodanjem u modulu *Explicit Dynamics*.



Slika 3.12: Simulacija obrade glodanjem u modulu *Explicit Dynamics* (ExpertFEA, 2016)

### 3.8.2 Programski paket *Third Wave AdvantEdge*

Programski paket *Third Wave AdvantEdge* je eksplicitni komercijalni program za projektovanje, unapređenje i optimizovanje procesa obrade (slika 3.13). Solver ovog programa (deo softvera koja rešava matematički problem) je prilagođen za obradu metala 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.

*AdvantEdge FEM* 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. Takođe, *AdvantEdge* sadrži i obimnu biblioteku materijala, u kojoj se nalaze najčešće korišćeni materijali: čelik, aluminijum, nerđajući čelik, titanijum, ali istovremeno omogućava korisnicima i predstavljanje novih materijala zasnovanih na osobinama već poznatih materijala.

Simulacija može da se radi u demonstracionom i standardnom modu. Demonstracioni mod smanjuje vreme trajanja simulacije, ali je manje precizan, dok standardni mod zahteva više vremena za trajanje simulacije, ali je i mnogo precizniji.



Slika 3.13: Uporedni prikaz simulacije procesa bušenja u *Third Wave AdvantEdge*-u i realnog stanja

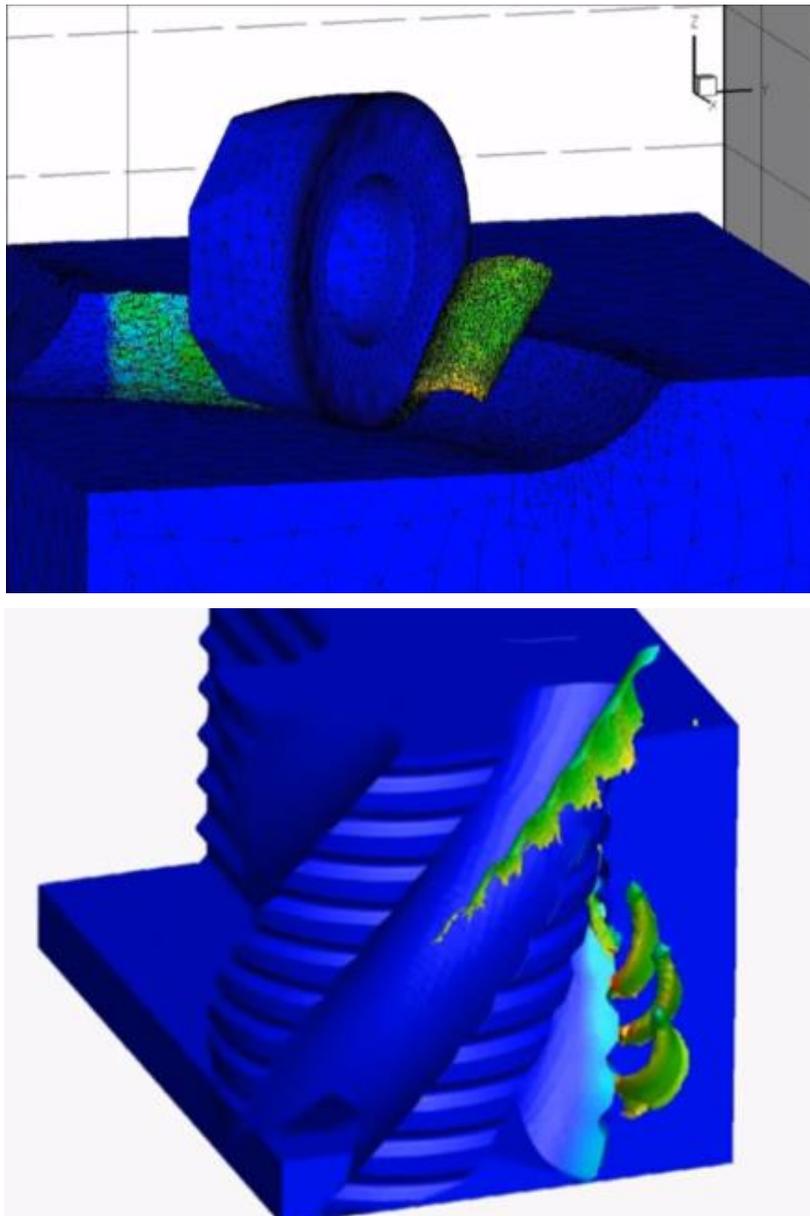
Simulacija može da se radi u demonstracionom i standardnom modu. Demonstracioni mod smanjuje vreme trajanja simulacije, ali je manje precizan, dok standardni mod zahteva više vremena za trajanje simulacije, ali je i mnogo precizniji.

*AdvantEdge* koristi trouglaste elemente sa šest čvorova u početnom podešavanju i kontinuirano umrežavanje da bi odvojio strugotinu. Tokom obrade rezanjem, materijal obratka obilazi oko rezne ivice alata i umrežavanje se radi svaki put kada elementi rezne ivice alata promene svoj inicijalni oblik. Zbog automatskog umrežavanja ovaj program omogućava i dozvoljava modeliranje simulacija obradaka složenih geometrija. U *AdvantEdge* korisnik

može da podesi granične uslove za svaki slučaj kada koristi alate koje je prilagodio svojim potrebama.

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. Na slici 3.14 dat je prikaz simulacija obrade glodanjem sa različitim glodalima.

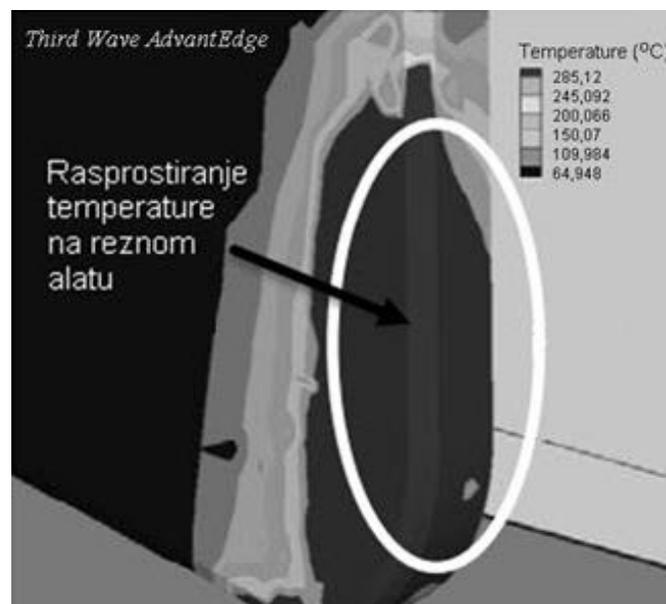
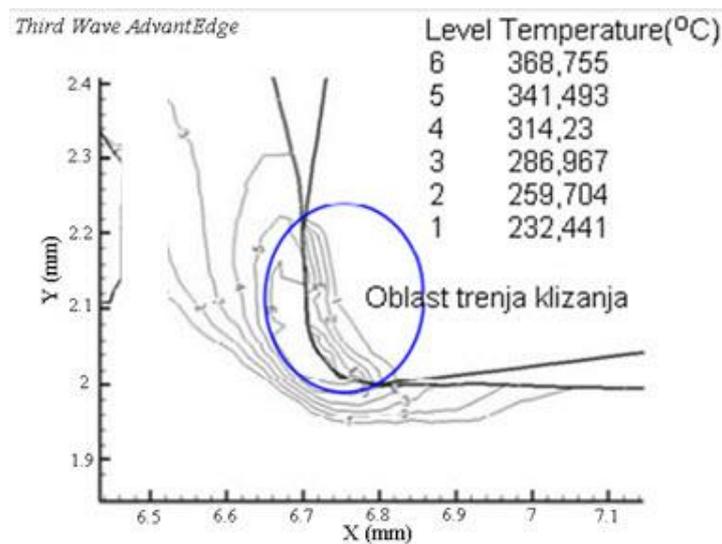
Neke od prednosti korišćenja ovog softvera su sledeće: smanjuje testove obrade rezanjem, produžava postojanost alata, smanjuje oštećenja alata, može da koristi složene geometrije alata i obradaka, ubrzava proces obrade, povećava produktivnost, povećava iskorišćenje alata i mašina i sl.



*Slika 3.14: Prikaz simulacija obrade glodanjem u Third Wave AdvantEdge-u*

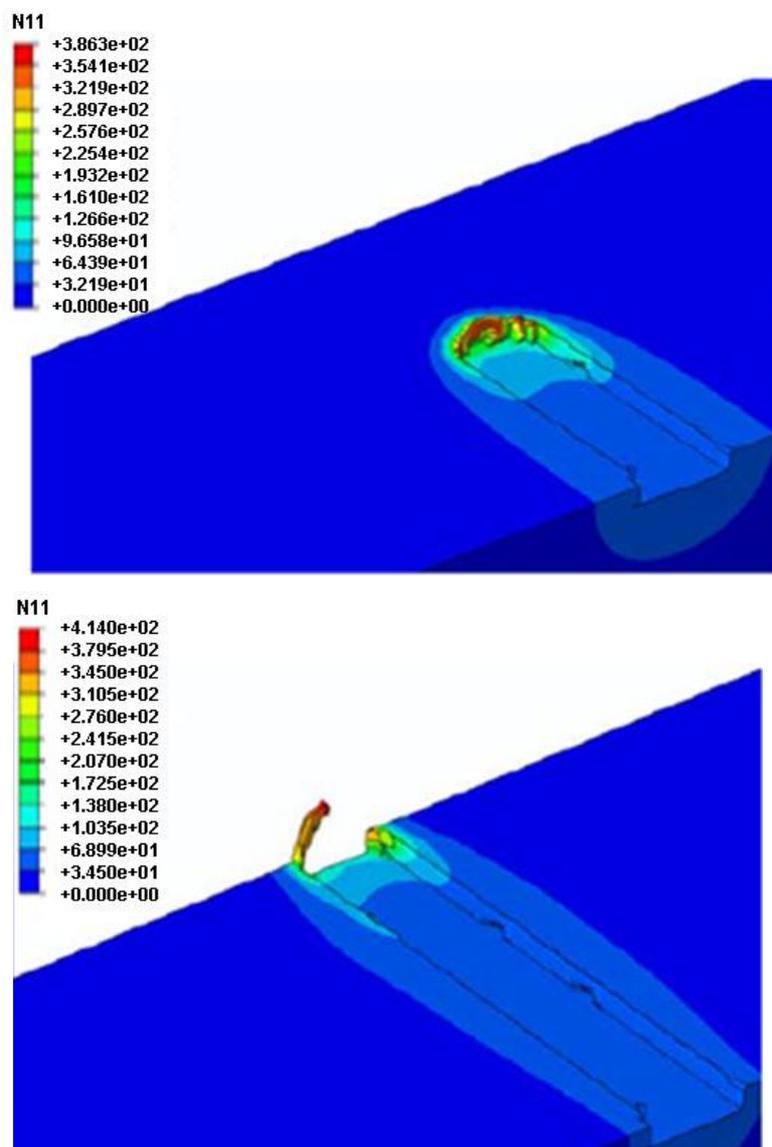
### 3.9 Pregled dosadašnjih istraživanja u obradi metala rezanjem metodom konačnih elemenata

Kadirgama i dr. (2009) ekperimentalno i metodom konačnih elemenata istražuju rasprostiranje toplote pri obradi glodanjem legure C 22HS. Izveden je niz eksperimenata sa vretenastim godalom prečnika 50 mm sa 4 rezne pločice i prevlakom od TiAlN. Temperatura na vrhu alata merena je infracrvenim termometrom. U programskom paketu *AdvantEdge* izabran je odgovarajući model obrade glodanjem, definisani su potrebni parametri procesa obrade i na osnovu dobijene simulacije provereni rezultati dobijeni eksperimentalnim putem. Maksimalna temperatura razvijena je na grudnoj površini na određenom rastojanju od vrha alata pre nego što se strugotina visoko izdigne. Na slici 3.15 prikazano je temperatursko polje pri obradi glodanjem dobijeno 3D simulacijom. Predviđene vrednosti temperature su veoma blizu eksperimentalnih sa blagim odstupanjem zbog zadate vrednosti koeficijenta trenja. Autori smatraju da se simulacijom u *AdvantEdge*-u može veoma detaljno prikazati rasprostiranje toplote oko reznog alata.



Slika 3.15: Temperatursko polje zone rezanja pri obradi glodanjem u *AdvantEdge*-u (Kadirgama i dr., 2009)

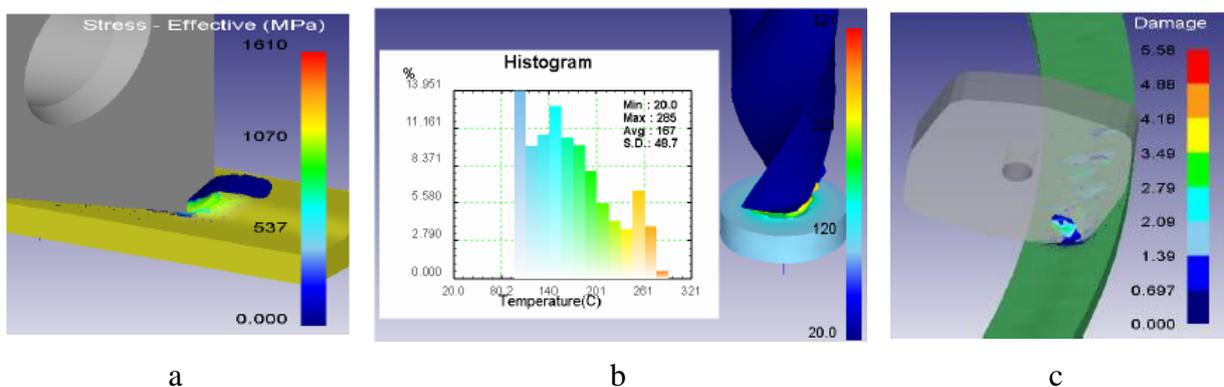
Escamilla i dr. (2010) u svom radu koriste programski paket *Abaqus/Explicit* za 3D simulaciju procesa obrade glodanjem sa vretenastim glodalom za predviđanje napona i temperatura na alatu i obratku. Za eksperimentalna ispitivanja korišćeno je vretenasto glodalo prečnika 3/8" sa prevlakom od AlTiN za obradu legure titanijuma Ti6Al4V. Ulazni parametri za simulaciju su brzina rezanja, korak i dubina rezanja. Visoki temperaturni gradijenti pronađeni su na početku procesa rezanja bez obzira na parametre rezanja. Za numeričku analizu napravljene su sledeće pretpostavke: zaobljene su ivice alata kako bi se izbegla distorzija mreže tokom simulacije, sredstva za hlađenje nisu uzeta u obzir i alat se modelira kao kruto telo sa vrlo visokim modulom elastičnosti. Na slici 3.16 je prikazana raspodela temperature u obratku. Može se videti visoki temperaturni gradijent koji nastaje usled trenja i plastične deformacije. Ovi temperaturni gradijenti mogu dovesti do brzog habanja alata. Poređenjem izračunatih i izmerenih vrednosti temperature može se videti da je temperatura dobijena simulacijom viša za skoro 100° C i to zbog činjenice da je rezni alat smatran krutim telom koje treba da bude u stanju da "crpi" toplotu iz obrađene površine.



Slika 3.16: Temperatursko polje na obratku u odgovarajućim trenucima u *Abaqus-u* (Escamilla i dr., 2010)

Constantin i dr. (2010 a) u radu prikazuju modeliranje i simulaciju procesa obrade glodanjem u programskom paketu *Deform-3D* i eksperimentalnu validaciju simuliranih otpora rezanja. Autori opisuju korake MKE analize: predprocesiranje, simuliranje i postprocesiranje podataka za ustanovljeni proces obrade i eksperimente glodanja. Za ispitivanje procesa obrade glodanjem korišćena je glava za glodanje prečnika 80 mm kreirana u AutoCAD-u, a zatim importovana u *Deform-3D*. Alat je izrađen od WC-a, a materijal radnog komada je čelik AISI 1045. Sprovedeni su eksperimentalni testovi za procenu simulacije obrade glodanjem. Eksperimentalna postavka sastoji se od vertikalnog obradnog centra, Kystler dinamometra, pojačala povezanog sa matičnom pločom računara za akviziciju, radnog predmeta AISI 1045 čelika i Sandvik glave za glodanje. Eksperiment je izveden sa istim prametrima rezanja kao u simulaciji. Razlika između simulacije i eksperimenta je u tome što je simulacija sprovedena sa alatom sa jednim zubom, a alat koji se koristio u eksperimentu imao je 6 zuba. Eksperimentalni rezultati potvrdili su u velikoj meri izmerene otpore rezanja, ali za bolju saglasnost rezultata model bi trebao da bude poboljšán. Prikazana je analiza najvažnijih rezultata simulacije i eksperimenta.

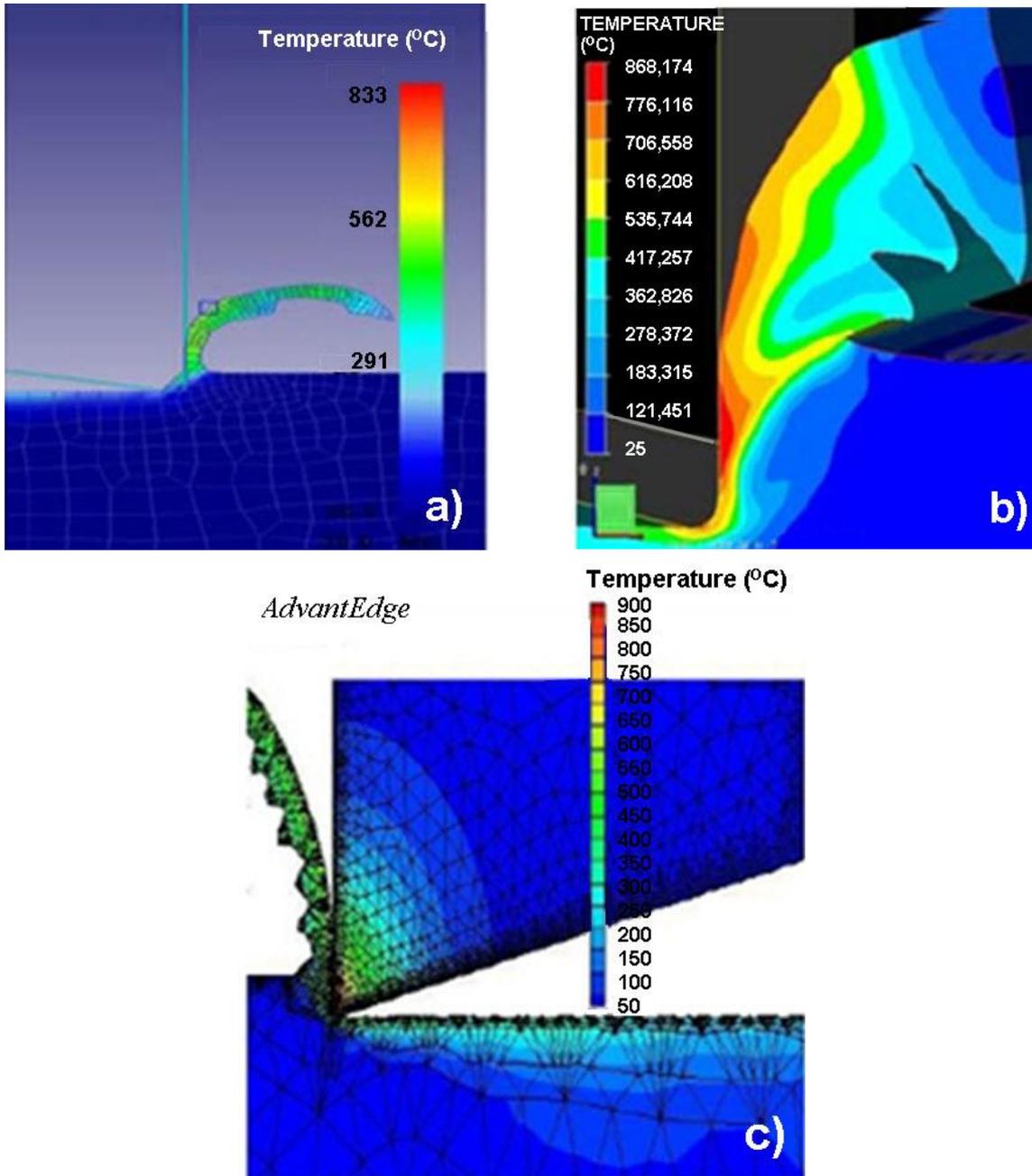
Constntin i dr. (2010 b) u radu prikazuju 3D modeliranje i simulaciju za procese struganja, bušenja i glodanja i opisuju poređenje između komercijalnih softvera *Abaqus*, *AdvantEdge* i *DEFORM-3D* koji se koriste za simulacije metodom konačnih elemenata. Opisani su koraci analize: pretprocesiranje, procesiranje i postprocesiranje podataka za uspostavljanje procesa obrade. Na slici 3.17 prikazani su rezultati simulacija za različite vrste obrade i različite izlazne performanse. Autori navode da se habanje alata takođe može odrediti i da struktura i svojstva materijala bitno utiču na otpore rezanja i na habanje alata. Za predmet obrade treba izabrati odgovarajući alat za modeliranje i simulaciju (struganja, bušenja, glodanja). Pod optimalnim performansama alata podrazumeva se tačna kombinacija između parametara rezanja i svojstava alata.



Slika 3.17: Rezultati simulacija: a) napon pri obradi struganjem, b) temperatura pri obradi bušenjem, c) naprslina na obratku pri obradi glodanjem (Constantin i dr., 2010 b)

Constantin i dr. (2012) prikazuju modeliranje i simulaciju ortogonalnog procesa rezanja korišćenjem metode konačnih elemenata za obradu legure titanijuma Ti6Al4V. Za obradu legure titanijuma korišćen je preporučeni alat od WC-Co bez prevlake jer je to legura koja se teško obrađuje rezanjem. U radu je napravljeno poređenje između tri programska paketa konačnih elemenata (*Deform-2D*, *Forge-2D* i *AdvantEdge*) pri čemu su istaknute prednosti i nedostaci korišćenih programa. Izvedene su četiri simulacije u svakom od programskih paketa koristeći četiri različita radijusa vrha alata: 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$ , and 40  $\mu\text{m}$ . Izvršeno je poređenje rezultata u pogledu otpora rezanja, formiranja strugotine i temperature. Na slici 3.18 prikazani su rezultati simulacija rasprostiranja temperature u strugotini za radijus vrha alata od 20  $\mu\text{m}$ , u sva tri programa. Može se videti da navedeni programi predviđaju slične vrednosti temperature u strugotini. *FORGE-2D* i *AdvantEdge* su u stanju da predvide

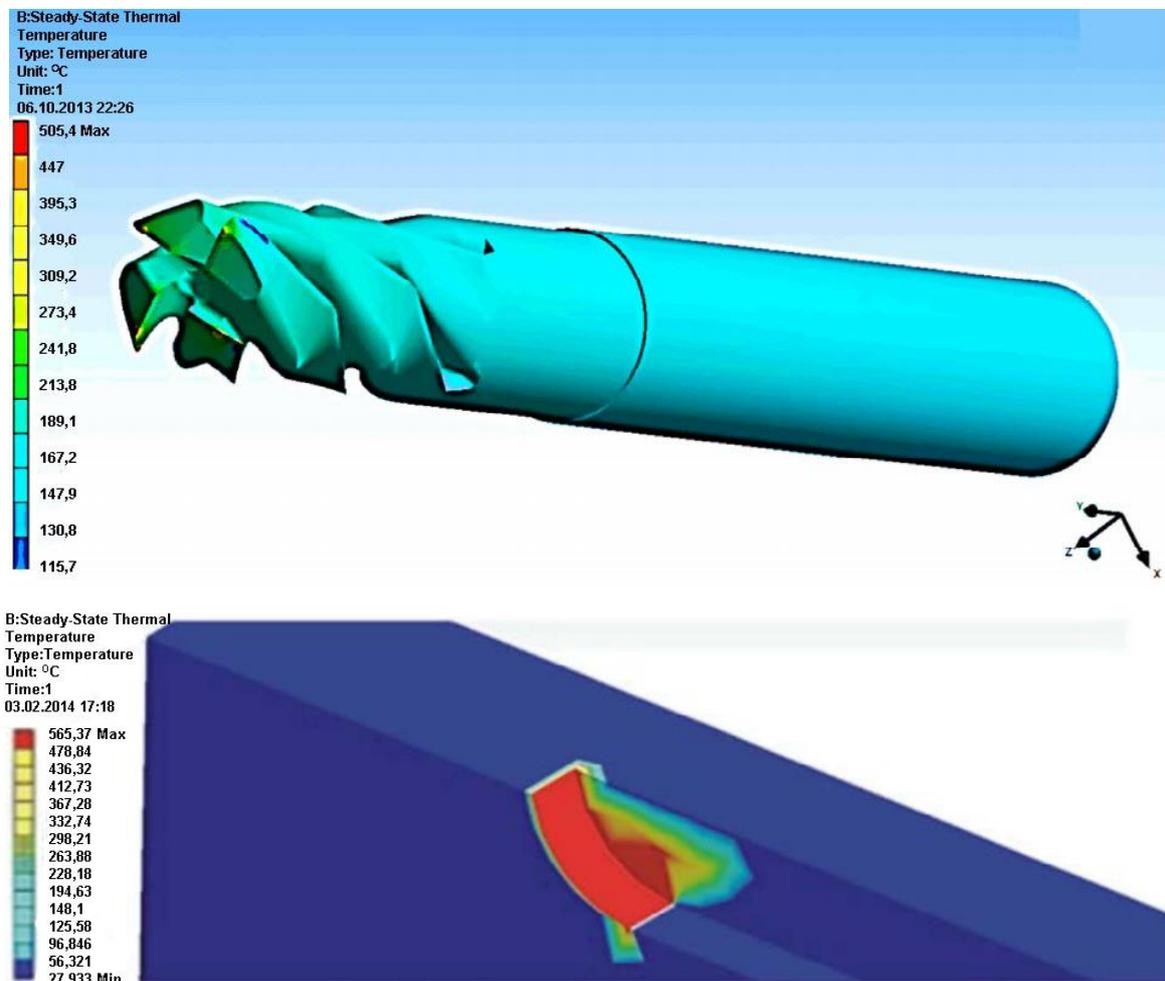
formiranje strugotine na leguri TiAl6V dok *DEFORM-2D* ne može predvideti tačno. Razlog za neispravno predviđanje formiranja strugotine u *DEFORM-2D* može biti *Johnson-Cook* konstitutivni model materijala koji ovde nije prikladan. Što se tiče računarskog vremena, odnosno vremena potrebnog za simulacije metodom konačnih elemenata, može se zaključiti sledeće: *DEFORM-2D*: 5-7 sati da završi jednu simulaciju, a oko 3 dana da završi sve četiri simulacije; *FORGE-2D*: u najmanje dve nedelje da završi četiri paralelne simulacije i *AdvantEdge*: oko 3 sata da završi jednu simulaciju, a oko 2 dana da završi sve četiri simulacije.



Slika 3.18: Rasprostiranje temperature u strugotini u: a) *Deform-2D*, b) *FORGE-2D*, c) *AdvantEdge*-u (Constantin i dr., 2012)

Fedorov i Skuratov (2014) u svom radu prikazuju virtuelni model obrade stepenaste površine vretenastim glodalom. Programski paket *ANSYS* korišćen je za proračun

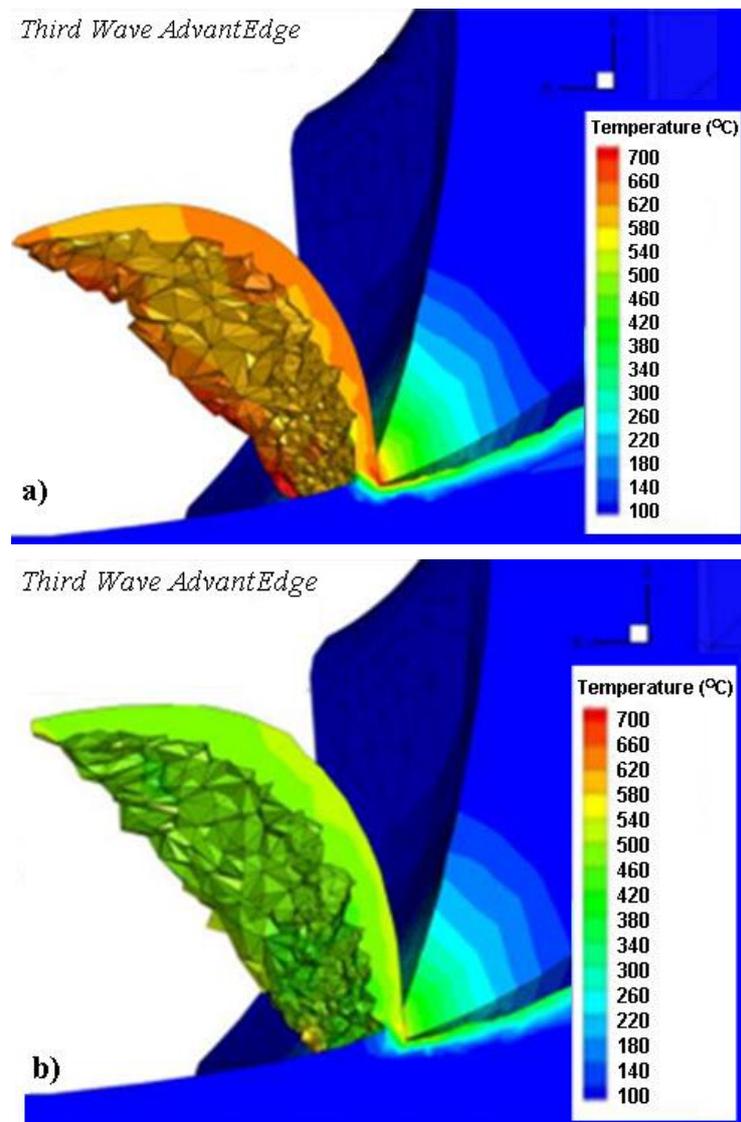
temperaturskih polja u alatu i radnom predmetu pod dinamičkim opterećenjem uzimajući u obzir hlađenje koje se koristi tokom obrade, dok su u programskom paketu *Abaqus* proračunati zaostali naponi u površinskom sloju radnog predmeta. Pri definisanju graničnih uslova virtuelnog modela tokom glodanja u *ANSYS*-u korišćeni su podaci o intenzitetu protoka toplote u zoni rezanja za obradu struganjem koje su autori sa određenim izmenama primenili za obradu glodanjem. Za proračun temperaturskih polja u *ANSYS*-u takođe je korišćena dužina kontakta strugotine sa grudnom površinom alata i ledne površine alata sa obrađenom površinom. Raspodela temperature dobijena na osnovu rezultata u modulu *ANSYS Workbench Thermal* prikazana je na slici 3.19.



Slika 3.19: Temperatursko polje na glodalu i obratku u *ANSYS*-u (Fedorov i Skuratov, 2014)

Niesłony i dr. (2015) u svom radu fokusiraju se na uticaj dva osnovna konstitutivna modela materijala radnog predmeta (*Power Law* i *Johnson-Cook*), kao i na rezultate i tačnost simulacije pri čeonom glodanju. Istraživanje je sprovedeno sa glavom za glodanje sa 6 pločica od tvrdog metala pri obradi legure titanijuma Ti6Al4V sa brzinom rezanja od 80 m/min, dubinom rezanja od 1 mm, širinom sečenja 10 mm i različitim korakom. Merenja temperature pri čeonom glodanju su realizovana korišćenjem HD infracrvena kamere X6540sc. Koeficijent emisivnosti za leguru titanijuma Ti6Al4V iznosio je 0,48. Tokom ispitivanja snimane su maksimalne temperature u zoni rezanja. Vrednosti maksimalne temperature su izračunate kao prosek dobijenih maksimalnih vrednosti za svaki kontakt rezne ivice sa obratkom tokom obrade. Programski paket *AdvantEdge* je korišćen za modeliranje procesa čeonog glodanja. U simulacijama su obuhvaćene komponente otpora rezanja i prosečne maksimalne temperature rezanja. Rezultati simulacije su upoređeni sa eksperimentalnim

podacima dobijenim za slične konfiguracije procesa glodanja. Utvrđeno je da vrsta konstitutivnog modela materijala utiče na vrednosti otpora rezanja i temperaturu. U ovom slučaju rezultati otpora rezanja kompatibilniji su sa eksperimentalnim podacima kada se koristiti *Johnson-Cook* model. S druge strane, dobijeno je veoma dobro uklapanje za temperaturu rezanja koristeći *Power Law* model. U ovim slučajevima veći otpori rezanja dovode do toga da se više toplote generiše i kao rezultat toga javljaju se više temperature u zoni rezanja. Takođe, utvrđeno je da korak ima značajan uticaj na prosečne temperature u zoni rezanja. Dva primera raspodele temperature u zoni rezanja dobijenog za modele *Power Law* i *Johnson-Cook* prikazana su na slici 3.20. Može se videti da su temperature u blizini rezne ivice za slučaj predstavljen na slici 3.20b niže nego na primeru na slici 3.20a. U radu je zaključeno da je praktična primena najtačnijeg konstitutivnog modela izuzetno teška i da su potrebni brojni eksperimenti za njihovu validaciju.



Slika 3.20: Razlike u distribuciji temperature pri simulaciji modela u zoni rezanja za (a) *Power Law* i (b) *Johnson-Cook* model (Niesłony i dr., 2015)

Reddy i dr. (2014) se u svom radu bave dobijanjem i poređenjem vrednosti izlaznih performansi tokom obrade glodanjem nerđajućeg čelika AISI 420 sa simuliranim vrednostima. Izabrana izlazna performansa je temperatura rezanja. Alat koji se koristi za rad je volfram karbid sa prevlakama od TiN i TiAlN. Simulacijama koje se izvode pomoću

programskog paketa *DEFORM-3D* za tri različite brzine rezanja dobijene su vrednosti temperature tokom svakog pojedinačnog procesa. Materijal je definisan u programskom paketu pomoću *Johnson-Cook* konstitutivnog modela. U realnom vremenu vrši se isti postupak za parametre obrade koji su korišćeni u programskom paketu na vertikalnom obradnom centru. Temperatura rezanja tokom procesa obrade snima se korišćenjem infracrvenog pirometra. Greška između eksperimenta i simulacije je u opsegu od  $\pm 40\%$  i autori smatraju da se rezultati rada mogu koristiti za optimizaciju parametara glodanja nerđajućeg čelika AISI 420.

## 4 MODELIRANJE PROCESA OBRADE PRIMENOM VIŠEFAKTORNOG PLANA EKSPERIMENTA

Modelom se iskazuju bitne osobine nekog objekta, procesa ili sistema. Sam matematički model sastoji se od sistema jednačina, stanja i algoritamskih pravila. Pri postavljanju matematičkog modela koriste se osnovni izvori informacija.

Osnovni cilj matematičkog modeliranja jeste:

- proračunavanje i analiza objekta, procesa ili sistema u cilju dobijanja, novih i potpunijih znanja i zakonitosti o proučavanom procesu;
- otkrivanje mehanizama međusobnog dejstva unutar proučavanog procesa;
- provera postavljenih hipoteza o zakonitostima i mehanizmima unutrašnjih međudejstava i sistema;
- prognoziranje stanja i ponašanja procesa, sistema i pojava;
- optimizacija na osnovu postavljenih kriterijuma optimizacije;
- upravljanje objektima, procesima ili sistemima u prostoru i vremenu (Stanić, 1983).

### 4.1 Višefaktorni planovi

Osnovne karakteristike višefaktornih eksperimentalnih planova su minimalni skup eksperimentalnih tačaka unutar eksperimentalnog hiperpostora (višestruko niži troškovi i kraće vreme trajanja skupih eksperimentalnih ispitivanja) kao i maksimalni skup informacija o efektima matematičkog modela procesa koji je formiran zahvaljujući istraživanju prema kibernetском pristupu.

Prva etapa eksperimentalnih istraživanja je prikupljanje, proučavanje i analiza svih raspoloživih i relevantnih informacija o objektu istraživanja. Rezultati prve etape su: spisak uticajnih faktora (po mogućnosti rangiran prema stepenu uticaja), granica rasipanja i druga obeležja faktora, kriterijumi i parametri optimizacije u skladu sa postavljenim ciljem i slično.

Ukoliko je broj uticajnih faktora veliki, neophodno je odvojiti manji broj značajnih od većeg broja manje uticajnih, primenom odgovarajućih metoda.

Najrasprostranjeniji eksperimenti su eksperimenti kod kojih se faktori variraju u dva nivoa (maksimalna i minimalna vrednost), pri čemu se srednja vrednost faktora ne tretira kao nivo variranja. To su eksperimenti tipa:

$$N = 2^k + n_0, \quad (4.1)$$

gde je:  $k$  – broj faktora (promenljivih),  $n_0$  – broj ponovljenih eksperimenta. Plan matrice višefaktornog plana mora zadovoljavati uslove simetričnosti, normalnosti i ortogonalnosti.

Ortogonalnost plana je jedna vrlo značajna karakteristika eksperimentalnog plana. Matematički se definiše izrazom:

$$\sum x_{iu}x_{ju} = 0, \quad i \neq j; \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, k. \quad (4.2)$$

Ova karakteristika plana znači da se informaciona matrica i disperziona matrica pretvara u dijagonalnu. To znači da se koeficijenti regresije izračunavaju (ocenjuju) nezavisno jedan od drugog. Time se veoma uprošćava proračun ovih koeficijenata.

Neki plan se naziva rotabilan ako je disperzija vrednosti višestruke regresije funkcija rastojanja od centra plana. To znači da je disperzija konstanta u svim tačkama podjednako udaljenim od centra eksperimentalnog plana.

Kriterijum kompozitivnosti određenog eksperimentalnog plana omogućuje da se eksperimentalni plan rastavi na sukcesivni niz planova. Prvi ciklus počinje sa jednostavnijim planom – planom prvog reda. Drugi i naredni ciklus su složeniji planovi - planovi drugog reda i narednih redova. Pri tome se pri obradi eksperimentalnih rezultata na kraju nekog plana ili ciklusa koriste i rezultati planova prethodnog ciklusa.

## 4.2 Višefaktorni planovi drugog reda

Za nelinearne polinomne funkcije odziva drugog reda Box i Wilson (1951) su postavili poseban metod u osnovi kojeg je sadržan centralni kompozicioni plan. Pomoću ovog plana može se:

- identifikovati optimalna oblast sa optimalnom tačkom na nepoznatoj površini funkcije odziva,
- matematički modelirati optimalna oblast adekvatnim polinomom drugog ili višeg reda,
- definisati tolerancijske granice optimalnog područja svake od promeljivih višefaktornog objekta.

Kovač (1987) u svojim radovima detaljno daje mogućnosti rešavanja analitičkih problema u procesima obrade materijala. Detaljno razrađuje i postavlja tipove jednačina koji aproksimiraju određenu posmatranu veličinu (sile rezanja, postojanost alata, temperaturu u zoni rezanja), dajući odgovor na to da li je postavljeni tip jednačine adekvatan, odnosno da li su izabrani parametri signifikantni, tj. značajni.

### 4.2.1 Centralni kompozicioni planovi drugog reda

Centralni kompozicioni plan drugog reda je jedan od osnovnih pojmova u teoriji regresionih modela drugog reda.

Kompozicija ovog plana je sledeća. Ako se u prvom ciklusu pokaže da su regresioni modeli prvog reda

$$\hat{y} = b_0x_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i, \quad (4.3)$$

neadekvatni ili nepotpuni model sa međusobnim uticajima,

$$\hat{y} = b_0x_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i<j}^k b_{ij} x_i x_j \quad (4.4)$$

čije su teorije izložene ranije, takođe pokaže neadekvatnim, modeliranje se nastavlja izborom jednog ili više modela drugog reda,

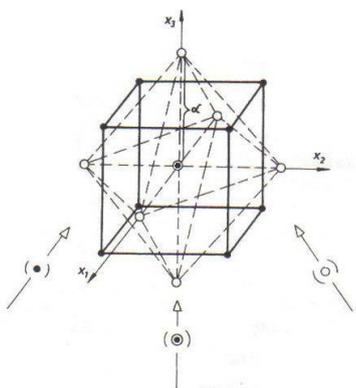
$$\hat{y} = b_0x_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii}x_i^2 + \sum_{i<j}^k b_{ij} x_i x_j \quad (4.5)$$

sve do modela koji se pokaže adekvatnim.

U strukturi ovih medela nalaze se članovi međusobnih uticaja prvog reda  $x_i x_j$  i članovi drugog reda  $x_i^2$ , bez trostrukih međusobnih uticaja faktora.

U cilju izbegavanja odstupanja usled sistematskih poremećaja, kompletan skup eksperimentalnih opita se izvodi slučajnim redosledom. Često je moguće izvesti ograničene grupe opita unutar više homogenih stanja. Moguće je veću tačnost postići deljenjem planova u blokove i uvođenjem opita unutar bloka slučajnim redosledom.

Mogućnost komponovanja ovih planova može da se vidi na slici 4.1. U prvom ciklusu se najčešće polazi od jednostavnih modelskih oblika i ortogonalnih planova nižeg reda. Zatim se nastavlja ukoliko se pokaže ovakav model neadekvatnim sa drugim ciklusom i uzima se model sa međusobnim uticajima. Pošto između višefaktornih planova prvog i višeg reda postoji međusobna povezanost, planovi višeg reda se komponuju tako da se ceo skup postojećih eksperimentalnih tačaka koristi u planu višeg reda. Ostaje onda samo da se izvedu dopunski eksperimenti u skladu sa planovima drugog reda. Na taj način se ostvaruje kontinuitet istraživanja kroz uzastopne cikluse. Takođe se na ovaj način postižu niži troškovi i kraće vreme istraživanja.



$$X = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} -\alpha & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix}$$

Slika 4.1: Mogućnost komponovanja planova drugog reda (Kovač, 2011)

### 4.3 Trofaktorni planovi drugog reda

#### 4.3.1 Regresiona analiza

Matematički model u stvarnim koordinatama ima oblik:

$$R = CF_1^{p_1} F_2^{p_2} F_3^{p_3} \exp[p_{11}(\ln F_1)^2 + p_{22}(\ln F_2)^2 + p_{33}(\ln F_3)^2 + p_{12} \ln F_1 \ln F_2 + p_{13} \ln F_1 \ln F_3 + p_{23} \ln F_2 \ln F_3] \quad (4.6)$$

gde je:  $C = \exp(p_0)$ ;  $R = \exp(\hat{y})$ .

Logoritmovanjem ove jednačine dobija se:

$$\begin{aligned} \hat{y} = & p_0 + p_1 \ln F_1 + p_2 \ln F_2 + p_3 \ln F_3 + \\ & + p_{11} (\ln F_1)^2 + p_{22} (\ln F_2)^2 + p_{33} (\ln F_3)^2 + \\ & + p_{12} \ln F_1 \ln F_2 + p_{13} \ln F_1 \ln F_3 + p_{23} \ln F_2 \ln F_3 \end{aligned} \quad (4.7)$$

dok je model u kodiranim koordinatama:

$$\begin{aligned} \hat{y} = & b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + \\ & + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Koeficijenti  $b_i$ ,  $b_{ij}$ ,  $b_{ii}$  se određuju metodom najmanjih kvadrata na osnovu formule u matematičkom obliku:

$$B = (X' \cdot X)^{-1} \cdot X' \cdot Y \quad (4.9)$$

gde je: B - matrica koeficijenata  $b_i$ ,  $b_{ij}$ ,  $b_{ii}$  koji se određuju

X - matrica plana eksperimenta

X' - transponovana matrica matrice X

$(X'X)^{-1}$  - inverzna matrica proizvoda matrice X'X

Y - matrica logaritmovanih vrednosti merene veličine

#### 4.3.2 Kodiranje i izbor faktora eksperimenta

Da bi se pojednostavila obrada podataka pomoću jednačine (4.9) vrši se kodiranje faktora eksperimenta pomoću jednačine:

$$x_i = 1 + 2 \frac{\ln F_u - \ln F_{i1}}{\ln F_{i1} - \ln F_{i2}}; \quad i = 1, 2; \quad u = 1 \div 3; \quad (4.10)$$

gde je:  $F_{i5}$  - kodirano  $x_i = -\sqrt{2}$  najniža vrednost faktora

$F_{i2}$  - kodirano  $x_i = -1$  niža vrednost faktora

$F_{i3}$  - kodirano  $x_i = 0$  srednja vrednost faktora

$F_{i1}$  - kodirano  $x_i = +1$  viša vrednost faktora

$F_{i4}$  - kodirano  $x_i = +\sqrt{2}$  najviša vrednost faktora

Za srednju vrednost faktora važi:

$$F_{i3}^2 = F_{i1} \cdot F_{i2} \quad (4.11)$$

Broj eksperimenata uključujući i srednji nivo zbog provere tačnosti  $k = 3$  faktornog eksperimenta uvećava se za  $n_0 = 4$  i  $n_\alpha = 12$ , pa je:

$$N = 2^k + n_0 + n_\alpha = 2^3 + 4 + 12 = 24$$

### 4.3.3 Određivanje koeficijenta regresije

Plan matrica ovako definisanih eksperimenata ima sledeći oblik:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

U korišćenom matematičkom modelu se nalaze uticaji drugog reda, pri čemu je  $\alpha = \sqrt{2}$ .

Inverzna matrica proizvoda matrica X i X' jeste:

$$(X'X)^{-1} = \frac{1}{48} \cdot \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & -4 & -4 & -4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4 & 0 & 0 & 0 & 4 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Množenjem matrica X' i Y dobija se matrica kolona:

$$X' \cdot Y = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{24} y_i \\ -y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8 + \sqrt{2}(-y_{13} + y_{14} - y_{19} + y_{20}) \\ -y_1 - y_2 + y_3 + y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8 + \sqrt{2}(-y_{15} + y_{16} - y_{21} + y_{22}) \\ -y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 + \sqrt{2}(-y_{17} + y_{18} - y_{23} + y_{24}) \\ \sum_{i=1}^8 y_i + 2(+y_{13} + y_{14} + y_{19} + y_{20}) \\ \sum_{i=1}^8 y_i + 2(+y_{15} + y_{16} + y_{21} + y_{22}) \\ \sum_{i=1}^8 y_i + 2(+y_{17} + y_{18} + y_{23} + y_{24}) \\ y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8 \\ y_1 - y_2 + y_3 - y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8 \\ y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Koeficijenti regresije su:

$$b_0 = \frac{1}{48} \left[ 10 \sum_{i=0}^{24} y_i - 4 \left( 3 \sum_{i=1}^8 y_i + 2 \sum_{i=13}^{24} y_i \right) \right]$$

$$b_1 = \frac{3}{48} \left[ -y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8 + \sqrt{2}(-y_{13} + y_{14} - y_{19} + y_{20}) \right]$$

$$b_2 = \frac{3}{48} \left[ -y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8 + \sqrt{2}(-y_{15} + y_{16} - y_{21} + y_{22}) \right]$$

$$b_3 = \frac{3}{48} \left[ -y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 + \sqrt{2}(-y_{17} - y_{18} - y_{23} + y_{24}) \right]$$

$$b_{11} = \frac{1}{48} \left[ -4 \sum_{i=1}^{24} y_i + 6 \sum_{i=1}^8 y_i + 6(y_{13} + y_{14} + y_{19} + y_{20}) + 2 \sum_{i=13}^{24} y_i \right]$$

$$b_{22} = \frac{1}{48} \left[ -4 \sum_{i=1}^{24} y_i + 6 \sum_{i=1}^8 y_i + 6(y_{15} + y_{16} + y_{21} + y_{22}) + 2 \sum_{i=13}^{24} y_i \right]$$

$$b_{33} = \frac{1}{48} \left[ -4 \sum_{i=1}^{24} y_i + 6 \sum_{i=1}^8 y_i + 6(y_{17} + y_{18} + y_{23} + y_{24}) + 2 \sum_{i=13}^{24} y_i \right]$$

$$b_{12} = \frac{6}{48} (y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8)$$

$$b_{13} = \frac{6}{48} (y_1 - y_2 + y_3 - y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8)$$

$$b_{23} = \frac{6}{48} (y_1 + y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8). \quad (4.15)$$

#### 4.3.4 Dekodiranje trofaktornog modela drugog reda

Računski model sa kodiranim faktorima eksperimenta ima oblik:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 +$$

$$+ b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (4.16)$$

Posle uvrštavanja vrednosti za kodirane faktore  $x_i$  (4.10), uz uprošćenja (4.11) dobija se sledeća jednačina:

$$\hat{y} = p_0 + p_1 \ln F_1 + p_2 \ln F_2 + p_3 \ln F_3 +$$

$$+ p_{11} (\ln F_1)^2 + p_{22} (\ln F_2)^2 + p_{33} (\ln F_3)^2 +$$

$$+ p_{12} \ln F_1 \ln F_2 + p_{13} \ln F_1 \ln F_3 + p_{23} \ln F_2 \ln F_3, \quad (4.17)$$

pri čemu je:

$$p_0 = b_0 + b_1a_1 + b_2a_2 + b_3a_3 +$$

$$+ b_{11}a_1^2 + b_{22}a_2^2 + b_{33}a_3^2 + b_{12}a_1a_2 + b_{13}a_1a_3 + b_{23}a_2a_3$$

$$p_1 = A_1(b_1 + 2b_{11}a_1 + b_{12}a_2 + b_{13}a_3) \quad p_2 = A_2(b_2 + 2b_{22}a_2 + b_{12}a_1 + b_{23}a_3)$$

$$p_3 = A_3(b_3 + 2b_{33}a_3 + b_{13}a_1 + b_{23}a_2)$$

$$p_{11} = b_{11}A_1^2 \quad (4.18)$$

$$p_{22} = b_{22}A_2^2$$

$$p_{33} = b_{33}A_3^2$$

$$p_{12} = b_{12}A_1A_2$$

$$p_{13} = b_{13}A_1A_3$$

$$p_{23} = b_{23}A_2A_3$$

Antilogaritmovanjem se dobija matematički model u stvarnim koordinatama:

$$R = CF_1^{p_1} F_2^{p_2} F_3^{p_3} \exp [ p_{11}(\ln F_1)^2 + p_{22}(\ln F_2)^2 + p_{33}(\ln F_3)^2 + p_{12} \ln F_1 \ln F_2 + p_{13} \ln F_1 \ln F_3 + p_{23} \ln F_2 \ln F_3 ] \quad (4.19)$$

gde je:  $C = \exp(p_0)$ ;  $R = \exp(\hat{y})$ .

#### 4.3.5 Disperziona analiza

Za ocenu signifikantnosti koeficijenata suma kvadrata i disperzioni odnosi će biti:

$$\begin{aligned} S_{b_0} &= \frac{48}{10} b_0^2 & s_{b_0}^2 &= \frac{S_{b_0}}{1} & F_{r_0} &= \frac{S_{b_0}^2}{S_E^2} \\ S_{b_i} &= \frac{48}{3} b_i^2 & s_{b_i}^2 &= \frac{S_{b_i}}{1} & F_{r_i} &= \frac{S_{b_i}^2}{S_E^2} \\ S_{b_{ii}} &= \frac{48}{4} b_{ii}^2 & s_{b_{ii}}^2 &= \frac{S_{b_{ii}}}{1} & F_{r_{ii}} &= \frac{S_{b_{ii}}^2}{S_E^2} \\ S_{b_{ij}} &= \frac{48}{6} b_{ij}^2 & s_{b_{ij}}^2 &= \frac{S_{b_{ij}}}{1} & F_{r_{ij}} &= \frac{S_{b_{ij}}^2}{S_E^2} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Kako su svi stepeni slobode  $f_1 = f_i = 1$ , disperzija u eksperimentalnim tačkama gde ima ponavljanja se računa:

$$S_{EA} = \sum_{u=9}^{12} (y_u - y_{sr})^2; \quad y_{sr} = \frac{1}{4} \sum_{u=9}^{12} y_u \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} S_{EB} &= \left[ y_{13} - \left( \frac{y_{13} + y_{19}}{2} \right) \right]^2 + \left[ y_{19} - \left( \frac{y_{13} + y_{19}}{2} \right) \right]^2 + \\ &+ \left[ y_{14} - \left( \frac{y_{14} + y_{20}}{2} \right) \right]^2 + \left[ y_{19} - \left( \frac{y_{14} + y_{20}}{2} \right) \right]^2 + \dots \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} S_{EB} &= \sum_{i=0}^5 \frac{(y_{13+i} - y_{19+i})^2}{2} \\ S_E &= S_{EA} + S_{EB} \\ S_E^2 &= \frac{S_E}{f_E}. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Kako postoji ponavljanje u nultoj tački i dva ponavljanja u dve tačke plana stepen slobode će biti:

$$f_E = n_0 - 1 + 2(n_u - 1) = 4 - 1 + 2(2 - 1) = 3 + 2 = 5.$$

Rezidualna suma jeste:

$$S_R = \sum_{i=1}^{24} (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.24)$$

$$s_R^2 = \frac{S_R}{f_R} \quad (4.25)$$

$$f_R = N - \frac{(k+1)(k+2)}{2} = 24 - \frac{4 \cdot 5}{2} = 14$$

$$s_a^2 = \frac{S_R - S_E}{f_a} \quad (4.26)$$

$$f_a = f_R - f_E = 14 - 5 = 9$$

Za signifikantnost tablična vrednost koeficijenta Fišerove raspodela je:

$$F_{t(1,5)} = 6,61.$$

Za adekvatnost tablična vrednost koeficijenta Fišerove raspodela je:

$$F_a = \frac{s_a^2}{s_E^2}; \quad F_{t(9,5)} = 4,47; \quad (4.27)$$

#### 4.3.6 Ocena tačnosti matematičkog modela

Ocena tačnosti se vrši pomoću intervala poverenja:

$$y_R \pm t_{\alpha f} \sqrt{\sigma(y)^2}. \quad (4.28)$$

Tablična vrednost prema Studentovoj raspodeli je:

$$t_{\alpha f} = t_{0,05,14} = 2,145$$

Za centralnu tačku standardna devijacija je:

$$\sigma(y)^2 = \frac{10}{48} s_R^2, \quad (4.29)$$

dok je za tačke na rogljevima modela:

$$\sigma(y)^2 = \frac{1}{48} (10 + 3 + 3 + 3 + 3 \cdot 4 + 3 \cdot 6 - 2 \cdot 3 \cdot 4 + 2 \cdot 3 \cdot 1) = \frac{31}{48} s_R^2. \quad (4.30)$$

Za tačke izvan kuba standardna devijacija jeste:

$$\sigma(y)^2 = \frac{1}{48} [10 + 4 \cdot 3 + 4 \cdot 4 \cdot 4 - 2(1 \cdot 2)^2 \cdot 4] = \frac{54}{48} s_R^2. \quad (4.31)$$

## 5 EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Ekperimentalna ispitivanja obrade glodanjem realizovana su u realnim, industrijskim uslovima, u firmi "Dinamic line" iz Čačka. Uslovi pri kojima je realizovan eksperiment odnose se na materijal obratka, mašinu alatku, rezni alat i parametre režima obrade. Ekperimentalna ispitivanja vršena su iz dva dela.

U prvom delu eksperimentalnog ispitivanja cilj je bio da se izmeri temperatura u zoni rezanja pri obradi glodanjem sa vretenastim glodalom od tvrdog metala u zavisnosti od primenjenih parametara režima obrade.

U drugom delu eksperimentalnog ispitivanja cilj je bio da se izmeri temperatura u zoni rezanja pri obradi glodanjem sa vretenastim glodalom od brzoreznog čelika u zavisnosti od primenjenih parametara režima obrade.

### 5.1 Uslovi pri eksperimentalnom ispitivanju

#### 5.1.1 Materijal predmeta obrade

Ekperimentalna ispitivanja su vršena sa jednim materijalom obratka i to čelikom za poboljšanje 30CrNiMo8 (stara oznaka Č.5432, a po AISI-u 4340). Materijal obratka u obliku šipke  $\phi 40 \times 3000$  mm isečen je na uzorke dužine 50 mm. Pre ispitivanja svi uzorci su obrađivani sa svih strana tako da su konačne dimenzije obratka bile 50x30x7 mm. Hemijski sastav čelika AISI 4340 prikazan je u tabeli 5.1, fizička svojstva u tabeli 5.2 a mehanička svojstva u tabeli 5.3.

Tabela 5.1: Hemijski sastav čelika AISI 4340

Oznaka legure	Hemijski sastav, %								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
30CrNiMo8	0,280	0,250	0,470	0,012	0,026	1,970	1,860	0,370	0,027

Tabela 5.2: Fizička svojstva čelika AISI 4340

Oznaka legure	Specifična gustina	Tačka topljenja	Specifična toplota	Toplotna provodljivost	Toplotno širenje (20°C)
30CrNiMo8	785 (kg/m <sup>3</sup> )	1450 (°C)	477 (J/kgK)	44,5 (W/mK)	11,5 · 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>

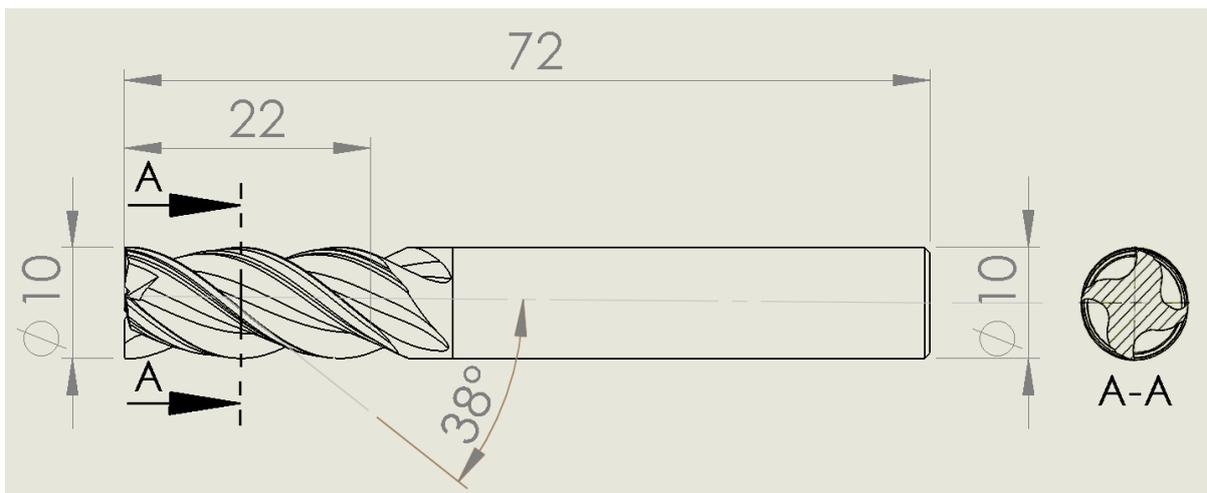
Tabela 5.3: Mehanička svojstva čelika AISI 4340

Oznaka legure	Zatezna čvrstoća	Izduženje	Modul elastičnosti	Tvrdoća (HB)	Poasonov koeficijent	Stanje isporuke
30CrNiMo8	1250MPa	10%	208 (GPa)	205	0,3	meko žaren

### 5.1.2 Alat

Pri ispitivanjima su korišćena dva vretenasta glodala. U prvom delu eksperimentalnog ispitivanja korišćeno je vretenasto glodalo od tvrdog metala, proizvođača ISCAR iz Izraela, sa oznakom EC-E41 10-22/32W10CF72 (*solid carbide end mill*) prečnika  $\varnothing 10$  mm (slika 5.1), sledećih karakteristika:

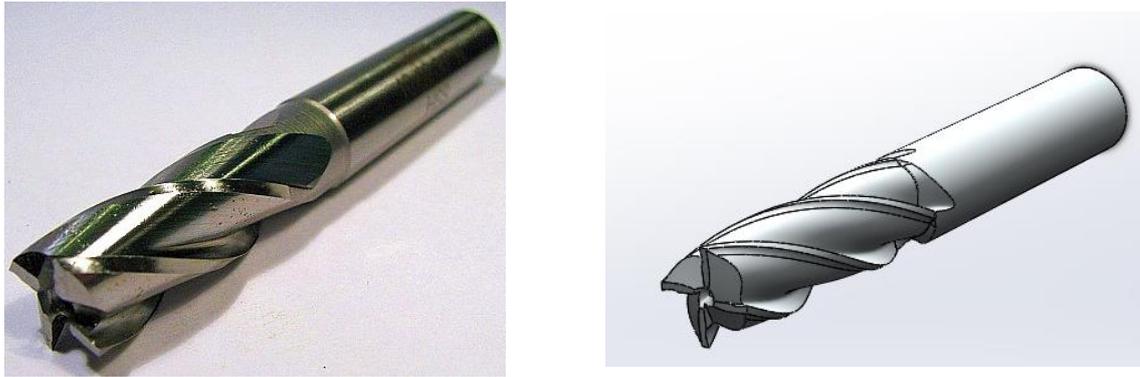
- broj zuba  $z = 4$ ,
- napadni ugao  $\chi = 30^\circ$ ,
- leđni ugao  $\alpha = 7^\circ$ ,
- grudni ugao  $\gamma = 12^\circ$ ,
- ugao zavojnice  $\omega = 38^\circ$
- materijal: tvrdi metal (TM).



Slika 5.1: Vretenasto glodalo EC-E41 10-22/32W10CF72

U drugom delu eksperimentalnog ispitivanja korišćeno je vretenasto glodalo od brzoreznog čelika, proizvođača Fabrike reznog alata iz Srbije, sa oznakom VG  $\varnothing 10$  DIN 844 A-K-N (slika 5.2), sledećih karakteristika:

- broj zuba  $z = 4$ ,
- napadni ugao  $\chi = 30^\circ$ ,
- leđni ugao  $\alpha = 6^\circ$ ,
- grudni ugao  $\gamma = 12^\circ$ ,
- ugao zavojnice  $\omega = 30^\circ$ ,
- materijal: brzorezni čelik (BČ).

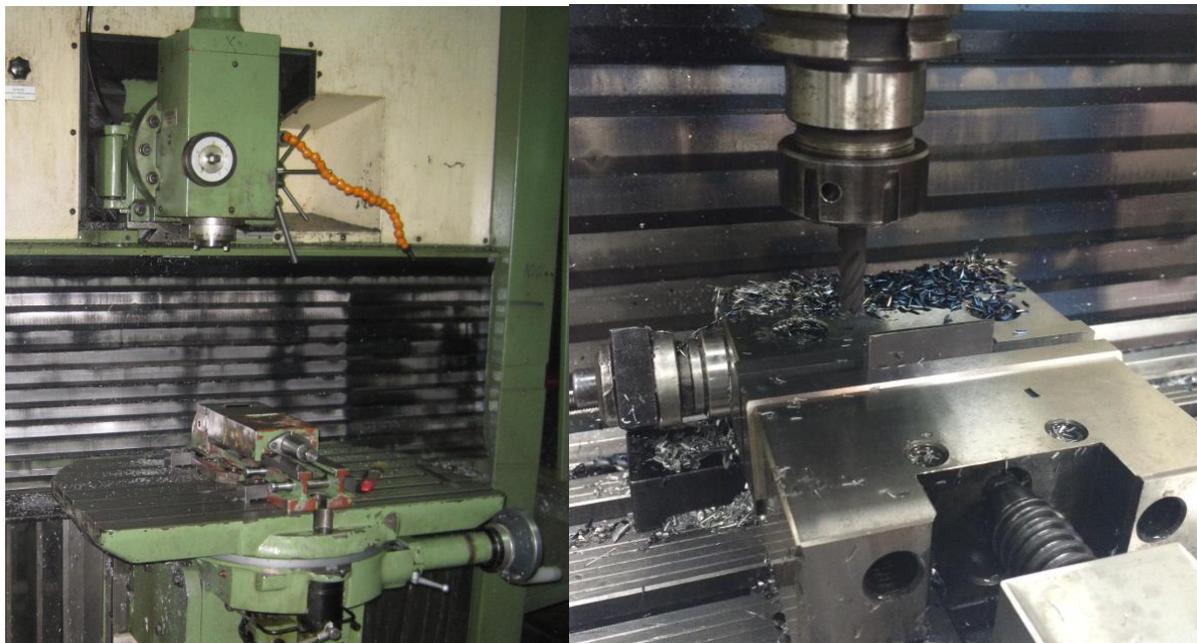


*Slika 5.2: Vretenasto glodalo VG Ø10 DIN 844 A-K-N*

### 5.1.3 Mašina alatka

Ekperimentalna ispitivanja vršena su na vertikalnoj glodalici "Maho 600C" (slika 5.3), nemačkog proizvođača Maho, u firmi "Dinamic line" iz Čačka, sa sledećim karakteristikama:

- snaga elektromotora za glavno kretanje 5,5 kW,
- snaga elektromotora za pomoćno kretanje 2 kW,
- broj obrtaja glavnog vretena  $10 \div 3150$  o/min sa 4 stepena prenosa,
- brzina pomoćnog kretanja  $0 \div 3000$  o/min sa 4 stepena prenosa,
- maksimalno opterećenje stola 1000 kg,
- najveći hod stola u pravcu:
  - x-ose 600 mm,
  - y-ose 500 mm,
  - z-ose 450 mm,
- mogućnost zaokretanja ose vretena do 90°.



*Slika 5.3: Vertikalna glodalica Maho 600C*

### 5.1.4 Režim obrade

Režim obrade obuhvatio je sledeće elemente:

- brzinu rezanja  $v$  (m/s), odnosno odgovarajući broj obrtaja na mašini  $n$  (o/min),
- korak po zubu  $s_z$  (mm/z),
- dubinu rezanja  $a$  (mm).

Variranje faktora vršeno je na 5 nivoa vrednosti, tako da je svaka srednja vrednost između dva susedna nivoa geometrijska sredina tih vrednosti (prikazano u tabelama 5.4 i 5.6). Režimi rezanja, prilagođeni materijalu obratka AISI 4340 i planu eksperimenta, prikazani su u tabelama 5.5 i 5.7. Obrada je vršena bez sredstva za hlađenje i podmazivanje. Izlazna veličina kod ovog eksperimenta bila je temperatura u zoni rezanja.

Tabela 5.4: Nivoi parametara eksperimenta sa glodalom od tvrdog metala

Nivo (kod)	Brzina rezanja $v$ (m/s)	Korak po zubu $s_z$ (mm/z)	Dubina rezanja $a$ (mm)	Broj obrtaja $n$ (o/min)
Gornji (+1.41)	1,31	0,035	2,00	2500
Srednje gornji (+1)	1,23	0,031	1,41	2345
Srednji (0)	1,15	0,028	1,00	2200
Srednje donji (-1)	1,1	0,025	0,71	2097
Donji (-1.41)	1,05	0,021	0,50	2000

Tabela 5.5: Režimi rezanja za glodalo od tvrdog metala

R.br.	$v$ (m/s)	$s_z$ (mm/z)	$a$ (mm)	R.br.	$v$ (m/s)	$s_z$ (mm/z)	$a$ (mm)
1	1,10	0,025	0,71	13	1,05	0,028	1,00
2	1,23	0,025	0,71	14	1,31	0,028	1,00
3	1,10	0,031	0,71	15	1,15	0,021	1,00
4	1,23	0,031	0,71	16	1,15	0,035	1,00
5	1,10	0,025	1,41	17	1,15	0,028	0,50
6	1,23	0,025	1,41	18	1,15	0,028	2,00
7	1,10	0,031	1,41	19	1,05	0,028	1,00
8	1,23	0,031	1,41	20	1,31	0,028	1,00
9	1,15	0,028	1,00	21	1,15	0,021	1,00
10	1,15	0,028	1,00	22	1,15	0,035	1,00
11	1,15	0,028	1,00	23	1,15	0,028	0,50
12	1,15	0,028	1,00	24	1,15	0,028	2,00

Tabela 5.6: Nivoi parametara eksperimenta sa glodalom od brzoreznog čelika

Nivo (kod)	Brzina rezanja $v$ (m/s)	Korak po zubu $s_z$ (mm/z)	Dubina rezanja $a$ (mm)	Broj obrtaja $n$ (o/min)
Gornji (+1.41)	0,34	0,077	2,00	650
Srednje gornji (+1)	0,31	0,063	1,41	600
Srednji (0)	0,29	0,045	1,00	550
Srednje donji (-1)	0,27	0,044	0,71	510
Donji (-1.41)	0,25	0,042	0,50	480

Tabela 5.7: Režimi rezanja za glodalo od brzoreznog čelika

R.br.	$v$ (m/s)	$s_z$ (mm/z)	$a$ (mm)	R.br.	$v$ (m/s)	$s_z$ (mm/z)	$a$ (mm)
1	0,27	0,044	0,71	13	0,25	0,045	1,00
2	0,31	0,044	0,71	14	0,34	0,045	1,00
3	0,27	0,063	0,71	15	0,29	0,042	1,00
4	0,31	0,063	0,71	16	0,29	0,077	1,00
5	0,27	0,044	1,41	17	0,29	0,045	0,50
6	0,31	0,044	1,41	18	0,29	0,045	2,00
7	0,27	0,063	1,41	19	0,25	0,045	1,00
8	0,31	0,063	1,41	20	0,34	0,045	1,00
9	0,29	0,045	1,00	21	0,29	0,042	1,00
10	0,29	0,045	1,00	22	0,29	0,077	1,00
11	0,29	0,045	1,00	23	0,29	0,045	0,50
12	0,29	0,045	1,00	24	0,29	0,045	2,00

## 5.2 Plan i opis ekspertimentalnih ispitivanja

### 5.2.1 Merenje temperature u zoni rezanja

Za merenje temperature u zoni rezanja korišćena je specijalna termovizijska kamera koja je osetljiva na zračenje tela koje se nalazi na određenoj temperaturi. Ova metoda merenja temperature izabrana je zbog prednosti nad ostalim metodama jer ima mogućnost registrovanja skokovitih promena temperature, nema fizičkog kontakta sistema i objekta čija se temperatura meri, nema negativnog uticaja na materijal obratka i alata, može se meriti temperatura objekata kojima je teško prići itd. Nepovoljna okolnost ove metode merenja je što strugotina svojim položajem može da zakloni oblast čija se temperatura meri (Young, 1996).

Kada se za merenje temperature koristi termovizijska kamera neophodno je poznavanje tačne vrednosti koeficijenta emisivnosti površine objekta. Emisivnost ili koeficijent emisivnosti je pojam koji predstavlja sposobnost materijala da emituje toplotno zračenje. Svaki materijal ima drugu emisivnost, a određivanje tačne emisivnosti nekog materijala je veoma teško. Koeficijent emisivnosti zavisi od čistoće površine čija se temperatura meri, postojanja sloja koji je oksidirao, talasne dužine i svaki od ovih faktora utiče na poremećaje u dobijanju validnih rezultata. Vrednost koeficijenta emisivnosti se kreće od 0,00 (ništa ne emituje) do 1,00 (potpuno emituje). U cilju izbegavanja ovog problema površina koja se obrađuje može se prethodno premazati slojem čiji je koeficijent emisivnosti poznat (O'Sullivan i Cotterell, 2011).

Snimanje temperature tokom eksperimenta sprovedeno je posredstvom termovizijske kamere FLIR InfraCAM Western (FLIR, 2007), prikazane na slici 5.4. Zbog emisivnosti obradak i glodalo su prethodno obojeni u crno.



*Slika 5.4 : Termovizijska kamera FLIR InfraCAM Western*

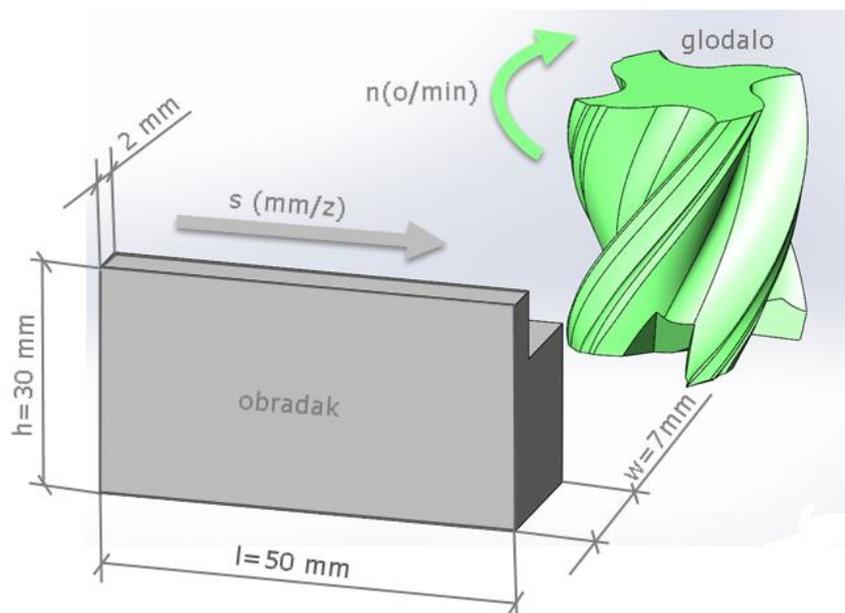
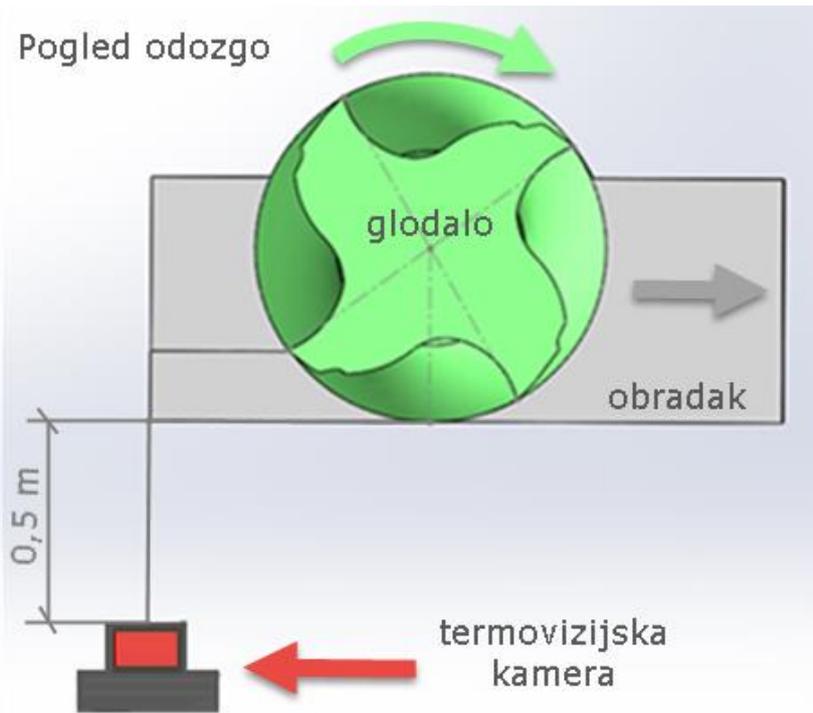
Karakteristike detektora su: vidno polje  $25^\circ \times 25^\circ$ ; model merenja tačka, zona minimuma i maximuma; tip detektora:  $120 \times 120$  pixels; spektralna zona (opseg): 7,5 do 13  $\mu\text{m}$ . Temperaturni opseg kamere je od  $-10^\circ \text{C}$  do  $+350^\circ \text{C}$ ; dok preciznost kamere iznosi  $0,1^\circ \text{C}$ .

Karakteristike prikaza slike su: ekran 3,5" color LCD,  $240 \times 240$  pixels; video izlaz: MPEG-4 preko USB-a. Na kameri se može skladištiti maksimalno 50 JPEG slika. Kamera poseduje laserski usmerivač: LocatIR klase2.

Ambijent u kome kamera može da radi: radna temperatura:  $-15^\circ \text{C}$  do  $+50^\circ \text{C}$ ; temperatura skladištenja:  $-40^\circ \text{C}$  do  $+70^\circ \text{C}$ ; otpornost na vodu i prašinu: IP 54; otpornost na udarac: 25G, IEC 68-2-29; otpornost na vibracije: 2G, IEC 68-2-6.

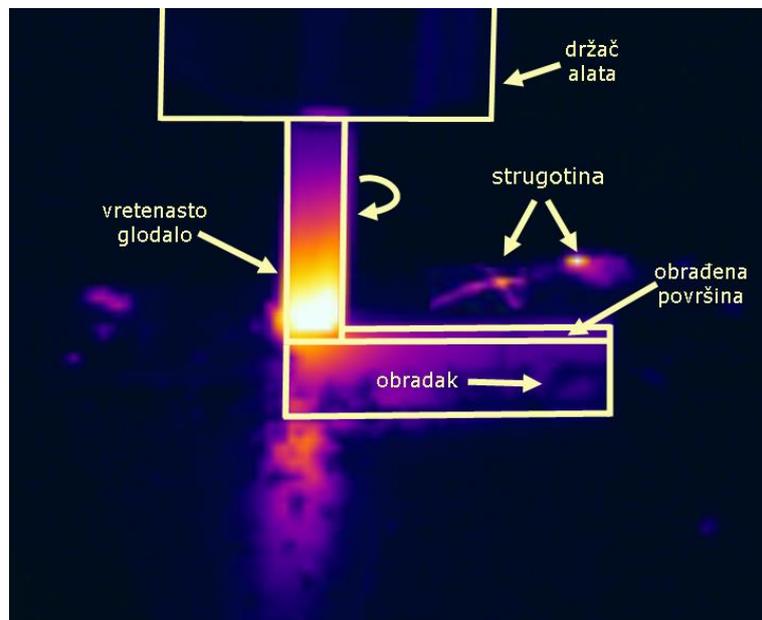
Fizičke karakteristike kamere : težina: 0.55kg, dimenzije: (L x W x H): 243mm x 81mm x 103mm.

Na slici 5.5 dat je šematski prikaz postavke eksperimenta za praćenje procesa čeonog glodanja vretenastim glodalom. Termovizijska kamera je postavljena u blizini zone obrade pri čemu je razmak između glodala i kamere iznosio 500 mm. Koeficijent emisivnosti na površini obratka i glodala iznosio je 0,96.



Slika 5.5: Šematski prikaz postavke eksperimenta

Na slici 5.6 prikazana je postavka termovizijske kamere i dobijeni termogram. Posmatranjem infracrvenog snimka tokom raspodele temperature može se odrediti temperatura nosača alata, glodala, obratka i strugotine.

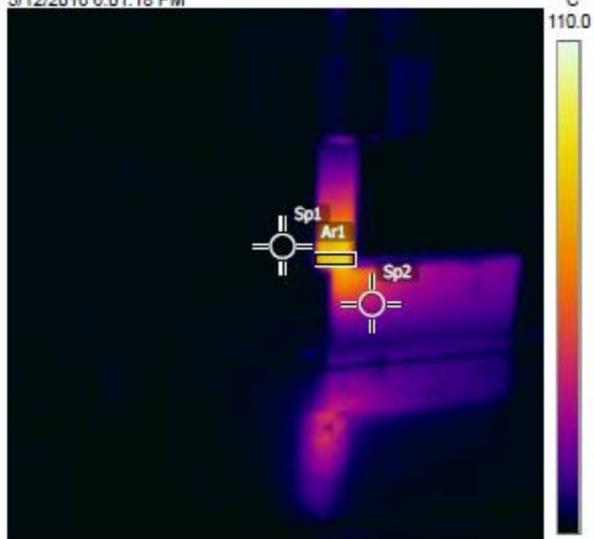


*Slika 5.6: Postavka termovizijske kamere i termogram*

### 5.3 Rezultati eksperimentalnih ispitivanja

Primenom termovizijske kamere, opisane u prethodnom poglavlju, a po planu eksperimenta navedenim u tabeli 5.5 i tabeli 5.7, izmerene su temperature u zoni rezanja. Na slikama od 5.7 do 5.10 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. Termovizijska kamera pri merenju temperature daje najmanju zonu merenja unutar kruga prečnika 5mm što bi obuhvatilo i prostor izvan zone rezanja, pa zbog toga ovaj način merenja nije izabran. U daljem radu prosečne temperature su poslužile za dobijanje trofaktornog modela temperatura u zavisnosti od parametara režima obrade. Pored primera datih na slikama 5.7 i 5.8, u prilogu I dat je prikaz preostalih snimaka registrovanih termovizijskom kamerom pri eksperimentalnim ispitivanjima.

5/12/2016 8:01:18 PM



IR\_0057.jpg

InfraCAM Wester

278002235

#### Measurements °C

Ar1	Max	95.6
	Min	30.7
	Average	81.0
Sp1		23.0
Sp2		53.0

#### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

#### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 1 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja  $v = 1,10$  m/s  
Korak po zubu  $sz = 0,025$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 0,71$  mm

5/12/2016 8:03:12 PM



IR\_0058.jpg

InfraCAM Wester

278002235

#### Measurements °C

Ar1	Max	117.2
	Min	57.3
	Average	104.4
Sp1		23.8
Sp2		58.8

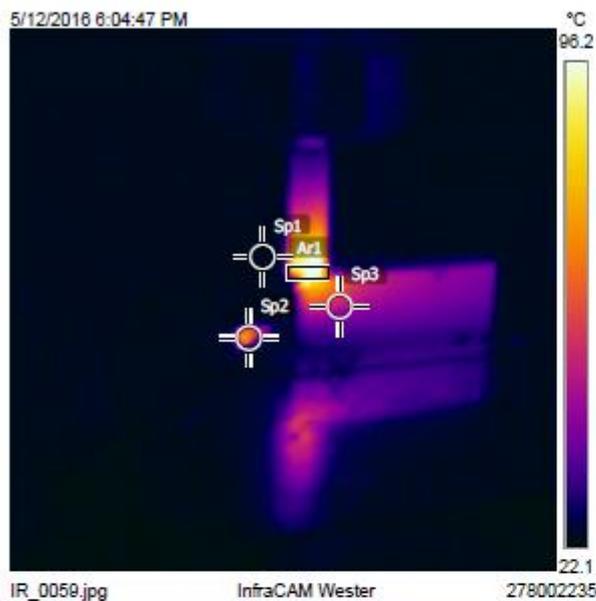
#### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

#### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 2 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja  $v = 1,23$  m/s  
Korak po zubu  $sz = 0,025$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 0,71$  mm

Slika 5.7: Primeri snimaka raspodele temperature za glodalo od tvrdog metala za režime obrade 1 i 2



Measurements °C

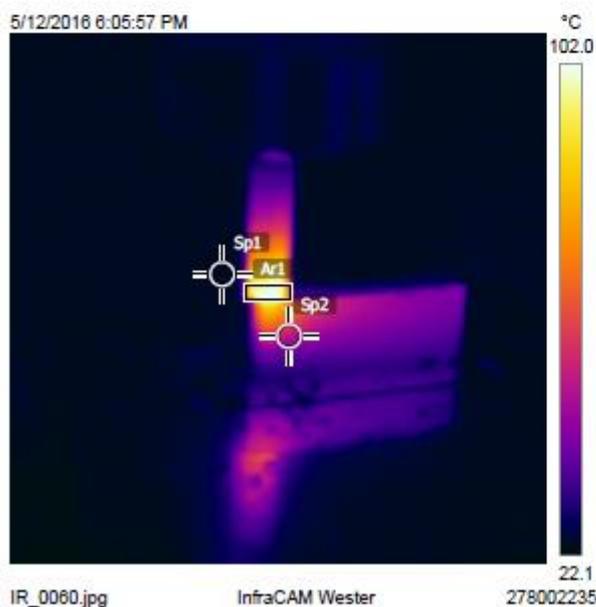
Ar1	Max	100.1
	Min	41.3
	Average	84.9
Sp1		23.6
Sp2		72.5
Sp3		54.4

Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 3 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,10 m/s  
Korak po zubu sz= 0,031 mm/z  
Dubina rezanja a= 0,71 mm



Measurements °C

Ar1	Max	104.1
	Min	70.8
	Average	96.8
Sp1		24.4
Sp2		56.3

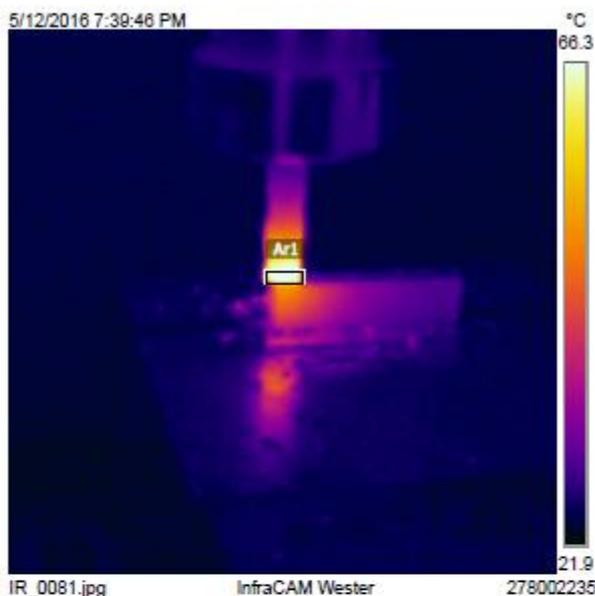
Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 4 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,23 m/s  
Korak po zubu sz= 0,031 mm/z  
Dubina rezanja a= 0,71 mm

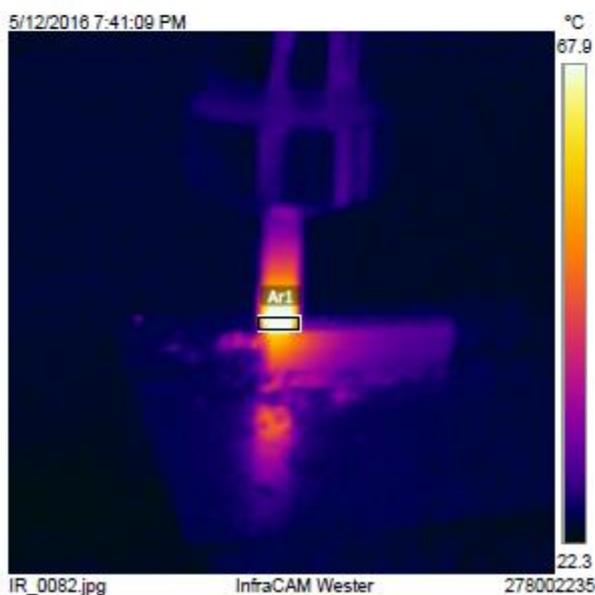
Slika 5.8: Primeri snimaka raspodele temperature za glodalo od tvrdog metala za režime obrade 3 i 4



Measurements		°C
Ar1	Max	69.5
	Min	50.0
	Average	64.9

Parameters	
Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

**Note**  
Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 1 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,27$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,044$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 0,71$  mm

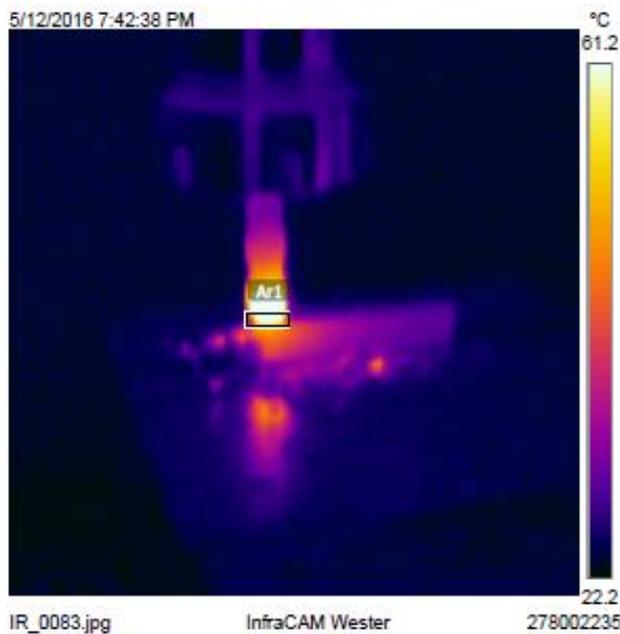


Measurements		°C
Ar1	Max	75.3
	Min	37.4
	Average	66.9

Parameters	
Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

**Note**  
Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 2 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,31$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,044$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 0,71$  mm

Slika 5.9: Primeri snimaka raspodele temperature za glodalo od brzoreznog čelika za režime obrade 1 i 2



Measurements °C

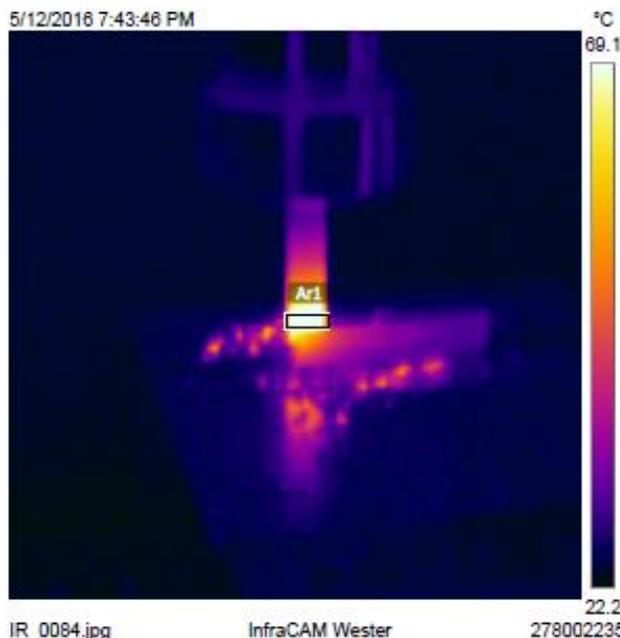
Ar1	Max	69.1
	Min	33.0
	Average	58.0

Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 3 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,27$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,063$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 0,71$  mm



Measurements °C

Ar1	Max	77.0
	Min	54.8
	Average	70.6

Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 4 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,31$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,063$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 0,71$  mm

Slika 5.10: Primeri snimaka raspodele temperature za glodalo od brzoreznog čelika za režime obrade 3 i 4

Obrada podataka po trofaktornom planu eksperimenta drugog nivoa (Kovač, 2011) izvršena je u programskom paketu Microsoft Excel i obuhvata regresionu i disperzionu analizu kao i ocenu tačnosti matematičkog modela. Plan eksperimenta se odvijao po redosledu prikazanom u tabelama 5.5 i 5.7.

Detaljan prikaz dobijanja modela dat je u prilogu II gde su razrađeni modeli za izlazne performanse procesa obrade glodanjem. Zasebno su razrađeni modeli bez međusobnog uticaja parametara i modeli sa međusobnim uticajem parametara. Opšti oblik ova dva tipa modela prikazan je u jednačinama 5.1 i 5.2. Jednačina 5.1 je formirana na osnovu jednačine 5.2, tako što su odbačeni proizvodi međusobnih uticaja pojedinih faktora.

Model bez međusobnog uticaja parametara:

$$R = C F_1^{p_1} F_2^{p_2} F_3^{p_3} \quad (5.1)$$

Model sa međusobnim uticajem parametara:

$$R = C F_1^{p_1} F_2^{p_2} F_3^{p_3} \exp [ p_{11} (\ln F_1)^2 + p_{22} (\ln F_2)^2 + p_{33} (\ln F_3)^2 + p_{12} \ln F_1 \ln F_2 + p_{13} \ln F_1 \ln F_3 + p_{23} \ln F_2 \ln F_3 ] \quad (5.2)$$

U datim jednačinama sa R je označena jedna od izlaznih performansi obradivosti procesa glodanja, dok parametri označeni sa F predstavljaju varirane faktore:

$F_1$  - brzina rezanja  $v$ , m/s

$F_2$  - korak po zubu  $s_z$ , mm/z

$F_3$  - dubina rezanja  $a$ , mm

### 5.3.1 Model temperature u zoni rezanja za glodalo od tvrdog metala

Trofaktorni model drugog reda za temperaturu u zoni rezanja pri čeonom glodanju u zavisnosti od brzine rezanja ( $v$ ), koraka po zubu ( $s_z$ ) i dubine rezanja ( $a$ ) je sledećeg oblika:

$$\theta = C v^{p_1} s_z^{p_2} a^{p_3} \exp [ p_{11} (\ln v)^2 + p_{22} (\ln s_z)^2 + p_{33} (\ln a)^2 + p_{12} \ln v \ln s_z + p_{13} \ln v \ln a + p_{23} \ln s_z \ln a ] \quad (5.2)$$

U tabeli 5.8 date su izmerene i računске vrednosti eksperimenta za trofaktorni model drugog reda sa vretenastim glodalom od tvrdog metala, a prema planu eksperimenta prikazanom u tabeli 5.5 u tabeli 5.9 su dati rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela.

Tabela 5.8: Izmerene i računске vrednosti za glodalo od tvrdog metala

Redni broj	Izmerene vrednosti	Računske vrednosti	
	Temperatura rezanja $\Theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Model bez međusobnog uticaja $\Theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Model sa međusobnim uticajem $\Theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	81,0	98,15	100,35
2	104,4	106,94	117,18
3	84,9	87,47	94,62
4	96,8	95,31	117,83
5	174,5	160,07	150,39
6	152,3	174,40	143,36
7	127,1	142,65	118,79
8	142,6	155,43	120,75
9	127,5	122,01	131,07
10	128,6	122,01	131,07
11	130,2	122,01	131,07
12	132,0	122,01	131,07
13	119,5	113,78	121,62
14	139,8	134,85	144,49
15	137,4	142,34	113,03
16	108,9	108,27	94,14
17	80,8	74,44	80,69
18	167,5	199,98	128,67
19	137,5	113,78	121,62
20	147,6	134,85	144,49
21	134,5	142,34	113,03
22	118,3	108,27	94,14
23	88,9	74,44	80,69
24	173,5	199,98	128,67

Tabela 5.9: Rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti za glodalo od tvrdog metala

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
Model bez međusobnog uticaja	C	16,1519	F <sub>r0</sub>	258659,72
	p <sub>1</sub>	0,76774	F <sub>r1</sub>	13,67
	p <sub>2</sub>	-0,53552	F <sub>r2</sub>	24,66
	p <sub>3</sub>	0,71285	F <sub>r3</sub>	444,52
	Adekvatnost			F <sub>a</sub>
Model sa međusobnim uticajem	C	6,64312E-22	F <sub>r0</sub>	27520,23
	p <sub>1</sub>	10,44970	F <sub>r1</sub>	7,06
	p <sub>2</sub>	-28,95329	F <sub>r2</sub>	12,74
	p <sub>3</sub>	-3,58393	F <sub>r3</sub>	229,56
	p <sub>11</sub>	-0,33721	F <sub>r11</sub>	0,00*
	p <sub>22</sub>	-3,91114	F <sub>r22</sub>	5,89*
	p <sub>33</sub>	-0,52413	F <sub>r33</sub>	10,95
	p <sub>12</sub>	2,67459	F <sub>r12</sub>	0,50*
	p <sub>13</sub>	-2,64854	F <sub>r13</sub>	7,41
	p <sub>23</sub>	-1,20000	F <sub>r23</sub>	3,76*
	Adekvatnost			F <sub>a</sub>

Napomena:

Za signifikantnost:  $F_n > F_t = 6,61$

Za adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

(\*) – Nesignifikantni parametri

### 5.3.2 Model temperature u zoni rezanja za glodalo od brzoreznog čelika

U tabeli 5.10 date su izmerene i računске vrednosti eksperimenta za trofaktorni model drugog reda sa vretenastim glodalom od brzoreznog čelika, a prema planu eksperimenta prikazanom u tabeli 5.7 u tabeli 5.11 su dati rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti modela.

Tabela 5.10: Izmerene i računске vrednosti za glodalo od brzoreznog čelika

Redni broj	Izmerene vrednosti	Računske vrednosti	
	Temperatura rezanja $\Theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Model bez međusobnog uticaja $\Theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Model sa međusobnim uticajem $\Theta$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	64,9	65,82	79,32
2	66,9	72,75	83,89
3	58,0	59,83	74,39
4	70,6	66,12	82,54
5	100,6	104,85	91,25
6	121,5	115,88	100,46
7	90,6	95,30	76,62
8	102,0	105,33	88,50
9	78,8	86,93	84,41
10	79,1	86,93	84,41
11	77,9	86,93	84,41
12	79,8	86,93	84,41
13	80,0	78,07	76,85
14	88,3	97,55	91,44
15	90,5	88,54	85,52
16	80,9	75,36	71,60
17	72,3	54,31	86,71
18	130,6	139,14	118,28
19	79,1	78,07	76,85
20	86,5	97,55	91,44
21	87,8	88,54	85,52
22	72,7	75,36	71,60
23	59,7	54,31	86,71
24	124,5	139,14	118,28

Tabela 5.11: Rezultati ocene signifikantnosti i adekvatnosti za glodalo od brzoreznog čelika

Model	Koeficijenti			
	Regresije		Signifikantnosti	
	Oznaka	Vrednosti	Oznaka	Vrednosti
Model bez međusobnog uticaja	C	93,3891	$F_{r0}$	176942,68
	p <sub>1</sub>	0,72412	$F_{r1}$	15,09
	p <sub>2</sub>	-0,26595	$F_{r2}$	13,74
	p <sub>3</sub>	0,67861	$F_{r3}$	326,91
	Adekvatnost		$F_a$	3,48229
Model sa međusobnim uticajem	C	305,149088	$F_{r0}$	17700,60
	p <sub>1</sub>	2,52380	$F_{r1}$	7,63
	p <sub>2</sub>	-0,20344	$F_{r2}$	6,95
	p <sub>3</sub>	-0,64328	$F_{r3}$	165,32
	p <sub>11</sub>	-0,42316	$F_{r11}$	0,01*
	p <sub>22</sub>	-0,19330	$F_{r22}$	0,09*
	p <sub>33</sub>	0,37903	$F_{r33}$	4,55*
	p <sub>12</sub>	0,96789	$F_{r12}$	0,22*
	p <sub>13</sub>	0,42383	$F_{r13}$	0,23*
	p <sub>23</sub>	-0,44884	$F_{r23}$	1,16*
	Adekvatnost		$F_a$	0,70131

Napomena:

Za signifikantnost:  $F_n > F_t = 6,61$

Za adekvatnost:  $F_a < F_t = 4,47$

(\*) – Nesignifikantni parametri

## 6 SIMULACIJA TOPLOTNIH POJAVA PRI GLODANJU U PROGRAMSKOM PAKETU ANSYS

Za kreiranje simulacija procesa obrade glodanjem u programskim paketima za analize uz pomoć MKE 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
- Definisane materijala alata i obratka
- Definisane parametara za simulaciju
- Računarska obrada simulacije
- Prikaz i analiza rezultata simulacije

Za izradu 3D modela alata i obratka korišćen je programski paket *SolidWorks*, pri čemu je, zbog složene geometrije, detaljno prikazana izrada 3D modela vretenastog glodala.

Za simulaciju procesa obrade glodanjem korišćen je programski paketi *ANSYS*.

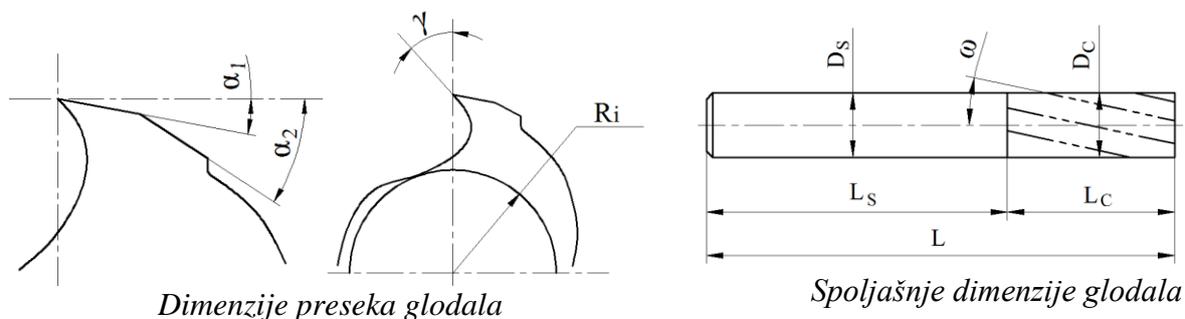
### 6.1 Izrada 3D modela vretenastog glodala u programskom paketu *SolidWorks*

Programski paket *SolidWorks* je integrisani paket koji se sastoji od softverskih alata za inženjersko projektovanje i automatizaciju procesa koji su zasnovani na parametarskom modelovanju punih tela. *SolidWorks* je prvi CAD paket koji koristi grafičko okruženje *Microsoft Windows*-a. Omogućava da se osnovna 2D skica pretvori u model punog tela pomoću jednostavnih, ali visokoefikasnih alata za modeliranje (Tickoo, 2015).

*SolidWorks 95* je prvi proizvod, nastao 1995. godine kao konkurent CAD programima kao što su *Pro/ENGINEER*, *I-DEAS*, *Unigraphics* i *CATIA*, a trenutno je jedan od najpopularnijih proizvoda na tržištu CAD programa (*SolidWorks 2016*). *SolidWorks* je samo jedan od proizvoda kompanije *SolidWorks Corporation*, koja je deo grupacije *Dassault Systemes*.

Prema istraživanjima proizvođača, preko 3 miliona inženjera i dizajnera u više od 230 hiljada kompanija koristilo je *SolidWorks* do 2015. Godine (*SolidWorks Fact Sheet*, 2016).

Osnovna geometrija vretenastih glodala sa cilindričnom drškom prikazana je na slici 6.1, dok su u tabeli 6.1 prikazani parametri za definisanje dimenzija vretenastih glodala (Kim i dr., 2008).

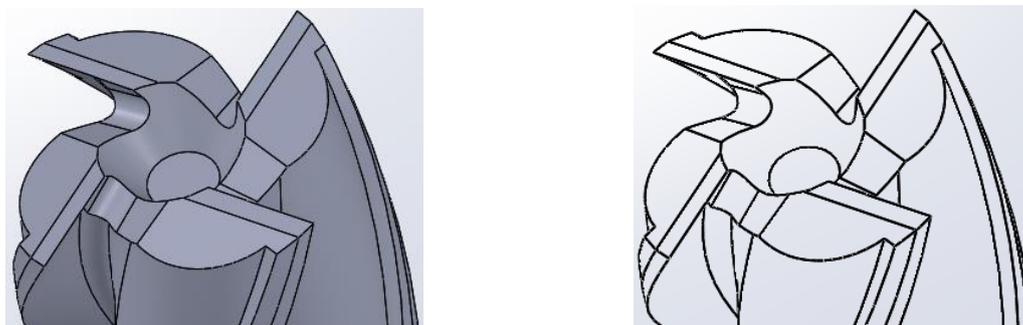


Slika 6.1: Osnovna geometrija vretenastih glodala sa cilindričnom drškom (Kim i dr., 2008)

Tabela 6.1: Parametri za definisanje dimenzija vretenastih glodala

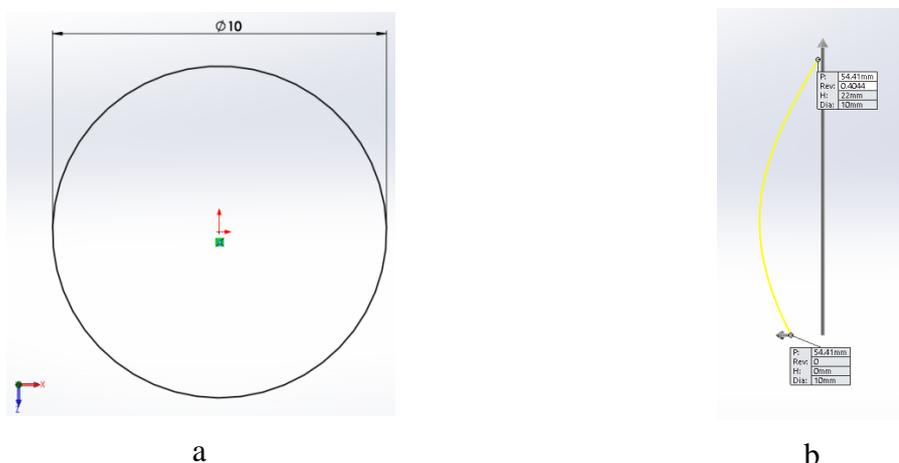
Parametri za definisanje dimenzija vretenastih glodala			
$\alpha_1$	prvi leđni ugao	$\alpha_2$	drugi leđni ugao
$\gamma$	grudni ugao	$R_i$	poluprečnik jezgra glodala
$\omega$	ugao zavojnice glodala	$D_s$	prečnik drške glodala
		$D_c$	nazivni prečnik glodala
$L_c$	dužina reznog dela glodala	$L_s$	dužina drške glodala
$L$	ukupna dužina glodala	$z$	broj zuba glodala

Na osnovu poznatih geometrijskih dimenzija koje definišu oblik vretenastog glodala prikazan je postupak modeliranja reznog dela glodala VG Ø10 DIN 844 A-K-N u *SolidWorks*-u. U obzir je uzet rezni deo glodala (slika 6.2) jer je za simulaciju obrade glodanjem potreban samo taj deo glodala.



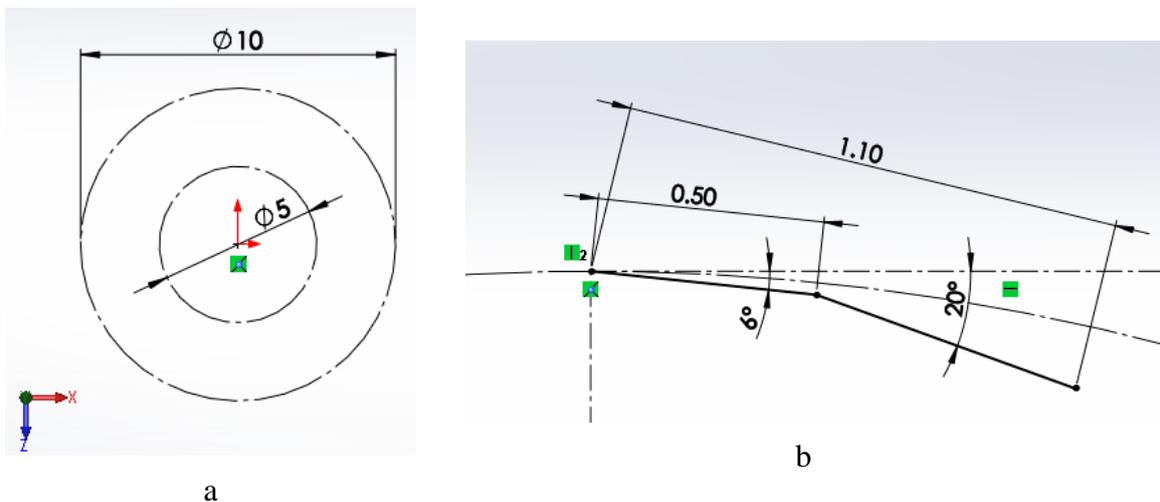
Slika 6.2: Rezni deo vretenastog glodala prikazan kao solid i žičani model u *SolidWorks*-u

Za modeliranje vretenastog glodala potrebno je prvo nacrtati kružnicu (slika 6.3a). Zatim se na osnovu nacrtane kružnice generiše zavojnica (slika 6.3b).



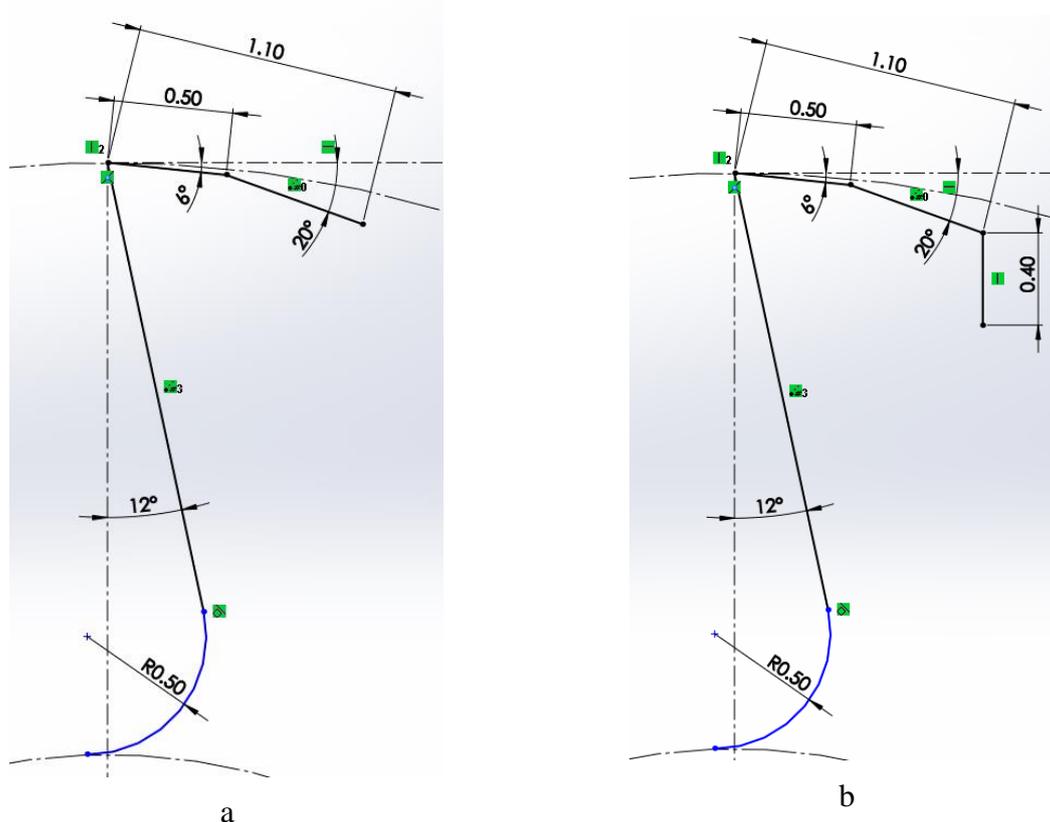
Slika 6.3: a) Kružnica sa nazivnim prečnikom glodala i b) zavojnica

Sledeći korak je crtanje koncentričnih kružnica (slika 6.4a) prečnika glodala i jezgra glodala pri čemu se izabere da kružnice budu konstrukcione (pomoćne linije koje se ne uzimaju u obzir pri kreiranju modela). Zatim se crta prvi oblik leđne strane zuba, a nakon toga drugi oblik leđne strane zuba (slika 6.4b).



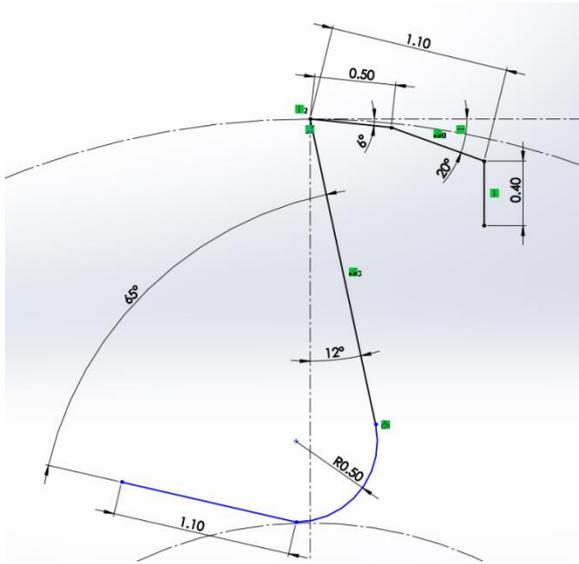
Slika 6.4: a) Koncentrične kružnice i b) prvi i drugi oblik leđne strane zuba

Na slici 6.5a prikazani su visina zuba glodala, grudni ugao i radijus zaobljenja međuzublja, dok je na slici 6.5b prikazan treći oblik leđne strane zuba.

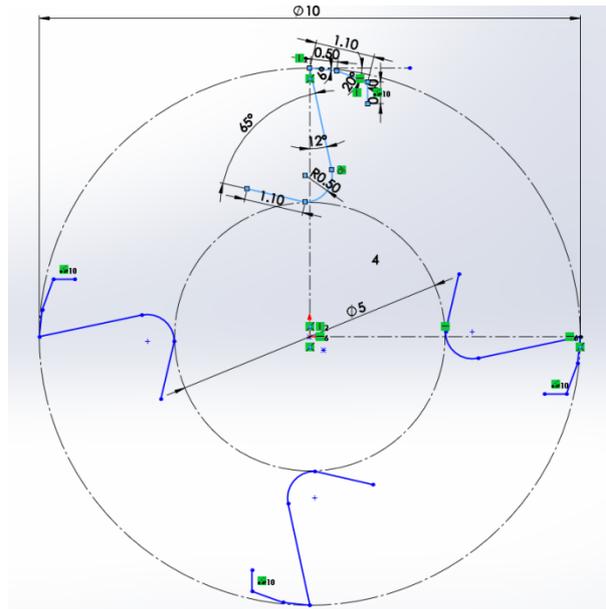


Slika 6.5: a) Visina zuba i radijus zaobljenja međuzublja i b) treći oblik leđne strane zuba

Kosina zuba i ugao kosine zuba prikazani su na slici 6.6a. Višestrukim kopiranjem po kružnici nacrtanog dela profila zuba glodala dobija se izgled prikazan na slici 6.6b.



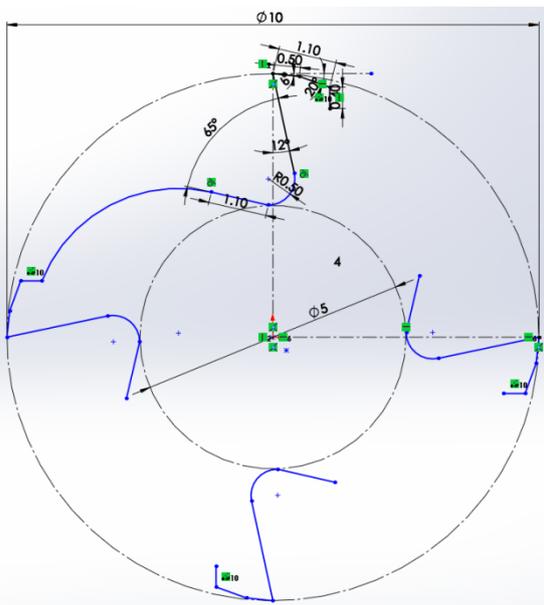
a



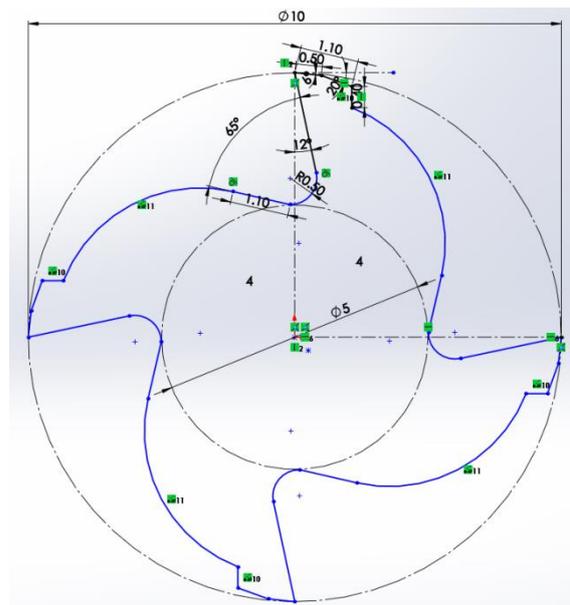
b

Slika 6.6: a) Ugao kosine zuba i b) višestruko kopiranje dela profila zuba glodala

Nakon toga crta se kriva linija na osnovu koje se dobija pomoćna površina koja sa grudnom površinom formira kanal za odvođenje strugotine (slika 6.7a). Višestrukim kopiranjem ove krive linije po kružnici dobija se konačan izgled prikazan na slici 6.7b. Na ovaj način definisani su svi geometrijski elementi reznih delova glodala.



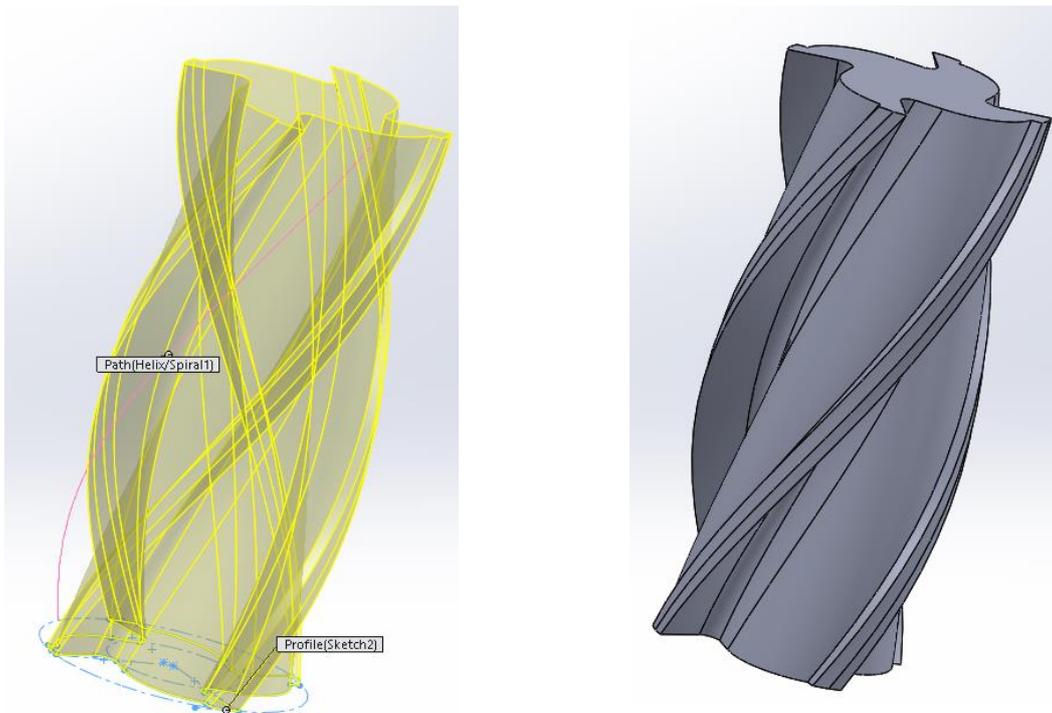
a



b

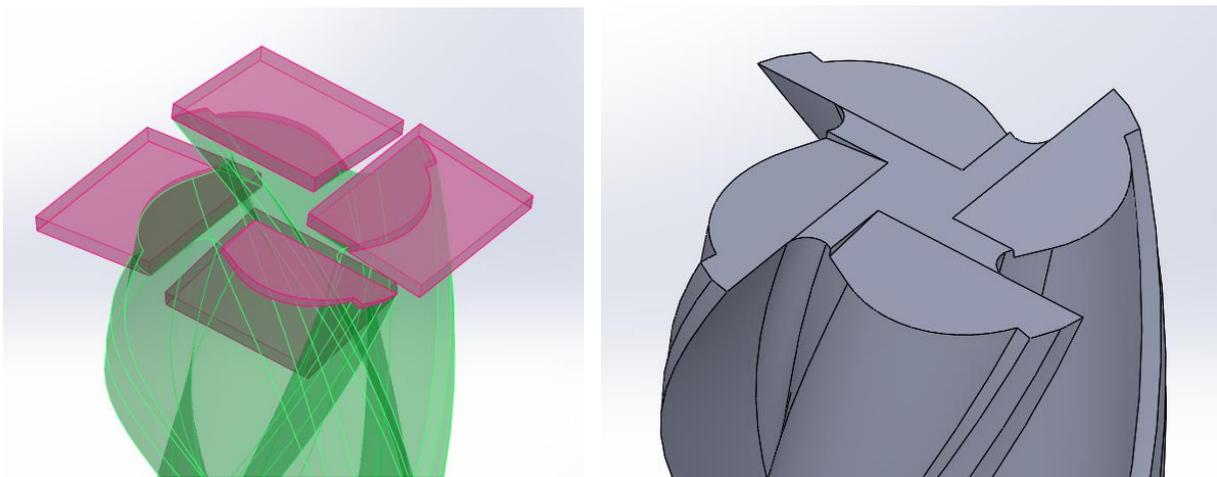
Slika 6.7: a) Prikaz zuba glodala i b) konačan izgled preseka profila glodala

Na osnovu kreiranog preseka (*Profile*) i zavojnice (*Helix*), može da se napravi telo reznog dela glodala izvijajući (*Sweep*) poprečni presek glodala duž zavojnice, slik 6.8.



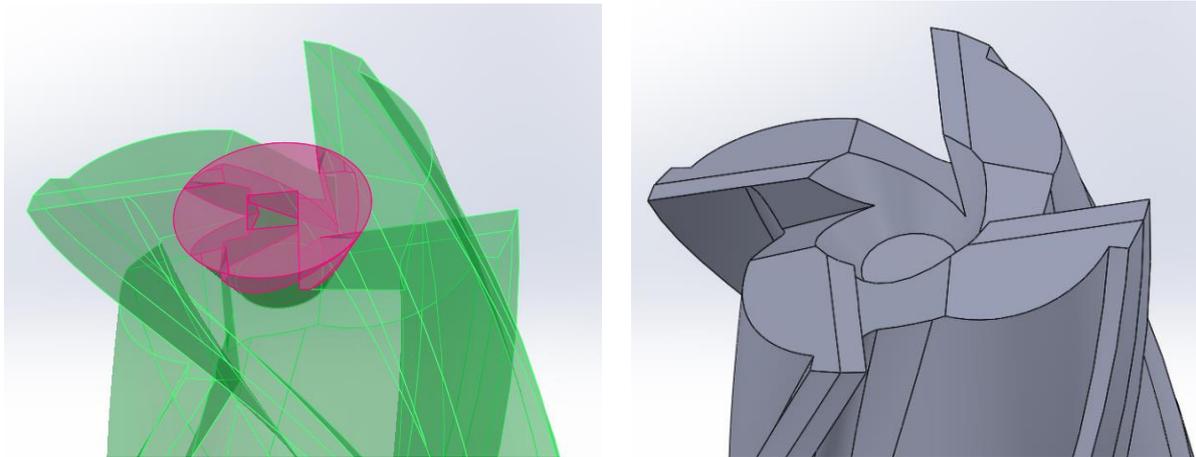
*Slika 6.8: Kreiranje reznog dela tela glodala*

Željeni uglovi na čeonj površini glodala dobijaju se presecanjem (*Intersect*) tela nacrtanim u odgovarajućim ravnima. Ravni se postavljaju tako da njihov položaj odgovara uglovima rezanja alata, slika 6.9.



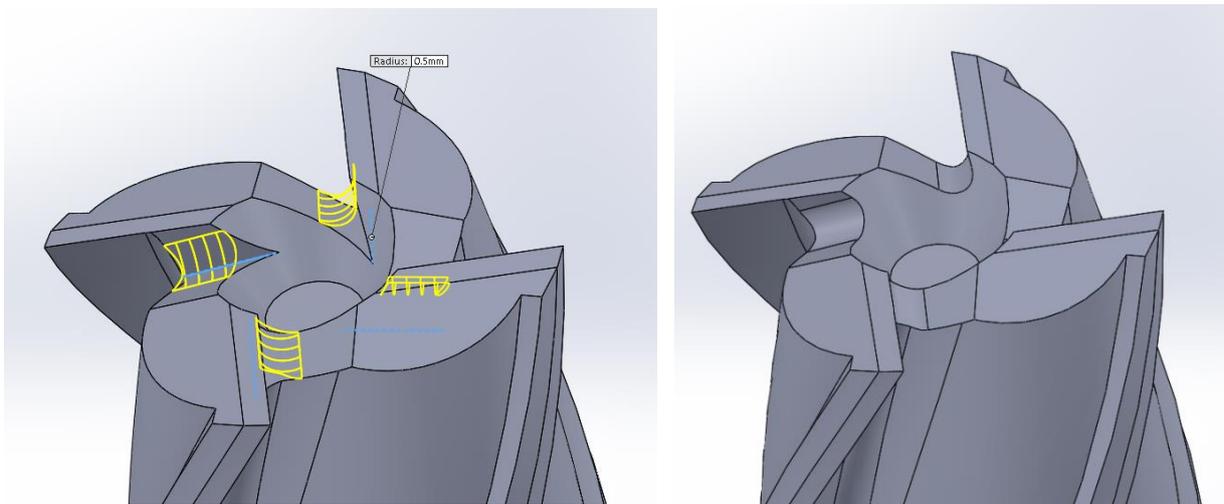
*Slika 6.9: Kreiranje uglova rezanja na čeonj površini glodala*

Da bi se dobio otvor na čeonj površini glodala napravljen je odgovarajući geometrijski objekat. Objekat je dobijen ekstrudiranjem kružnice pod konusom. Nakon toga presecanjem (*Intersect*) tog objekta sa čeonom površinom glodala dobijen je izgled prikazan na slici 6.10.



*Slika 6.10: Kreiranje otvora na čeonj površini glodala*

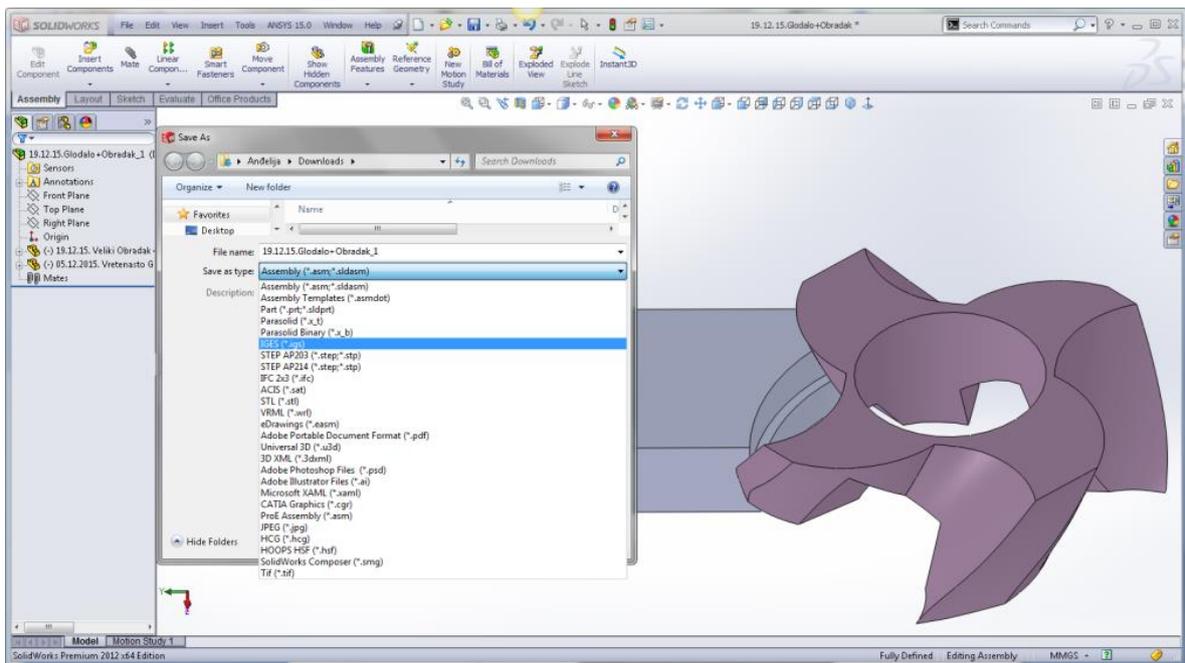
Konačan izgled glodala prikazan na slici 6.11 dobija se dodavanjem zaobljenja (*Fillet*) međuzublja glodala.



*Slika 6.11: Konačan izgled glodala*

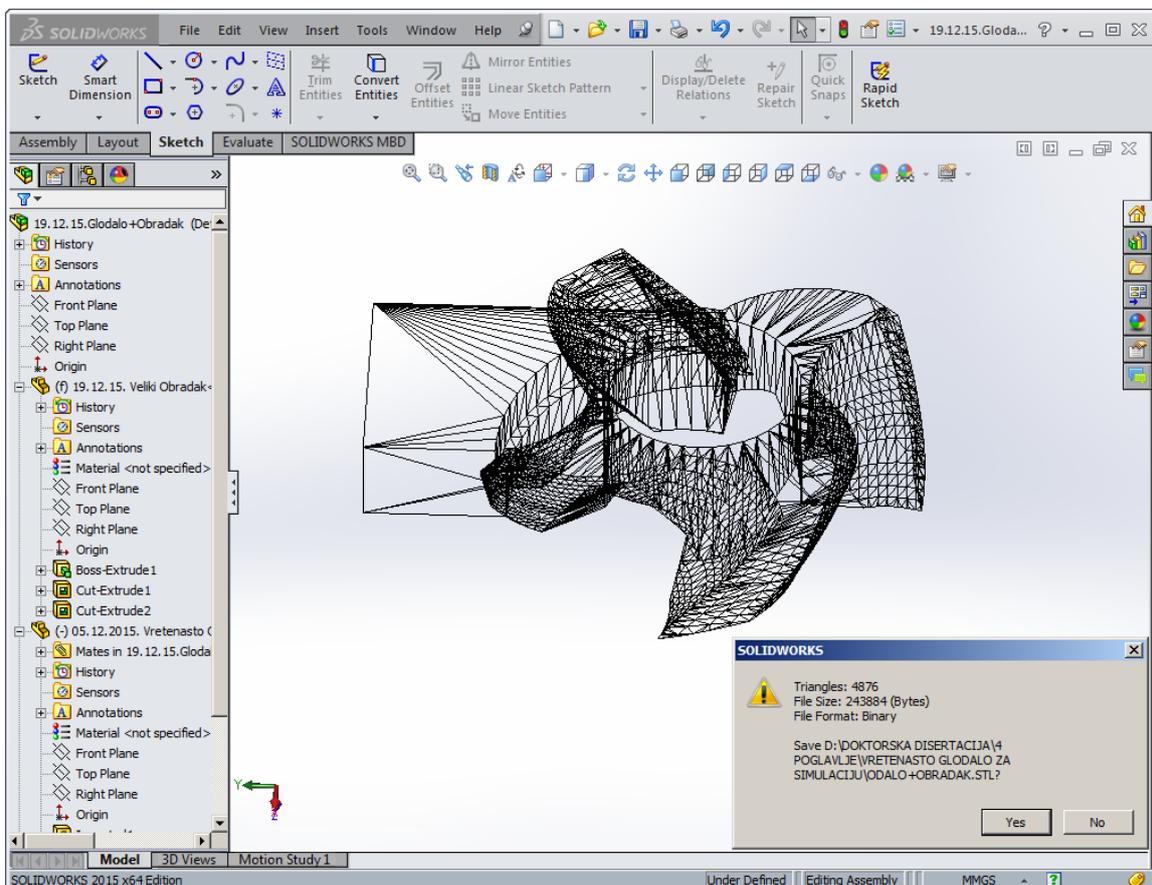
Pored prethodno opisanog modela vretenastog glodala napravljen je još jedan pojednostavljen model glodala kako bi broj čvorova i elemenata mreže modela bio manji. Na pojednostavljenom modelu uklonjeni su jezgro glodala, drugi leđni ugao i zaobljenje međuzublja glodala.

Nakon izrade 3D modela alata i obratka vrši se snimanje fajla u odgovarajućem formatu. *SolidWorks* fajlovi koriste *Microsoft Structured Storage* fajl format. To znači da postoje različiti fajlovi ugrađeni u svaki *slddrw* (crteži), *sldprt* (delovi) i *sldasm* (sklopovi) fajl, uključujući prikaz bitmapa i pod-fajlove metapodataka. *SolidWorks* podržava različite tipove fajlova (IGES, STL, STEP...) za povezanost između različitih programskih paketa (slika 6.12).



Slika 6.12: Snimanje modela iz SolidWorks-a u IGES formatu

STL je standardni tip formata fajla koji opisuje samo površinsku geometriju (trouglastim površinama) trodimenzionalnih modela bez ikakvog predstavljanja boja, tekstura ili drugih atributa zajedničkih za CAD modele (slika 6.13).



Slika 6.13: Snimanje modela iz SolidWorks-a u STL formatu

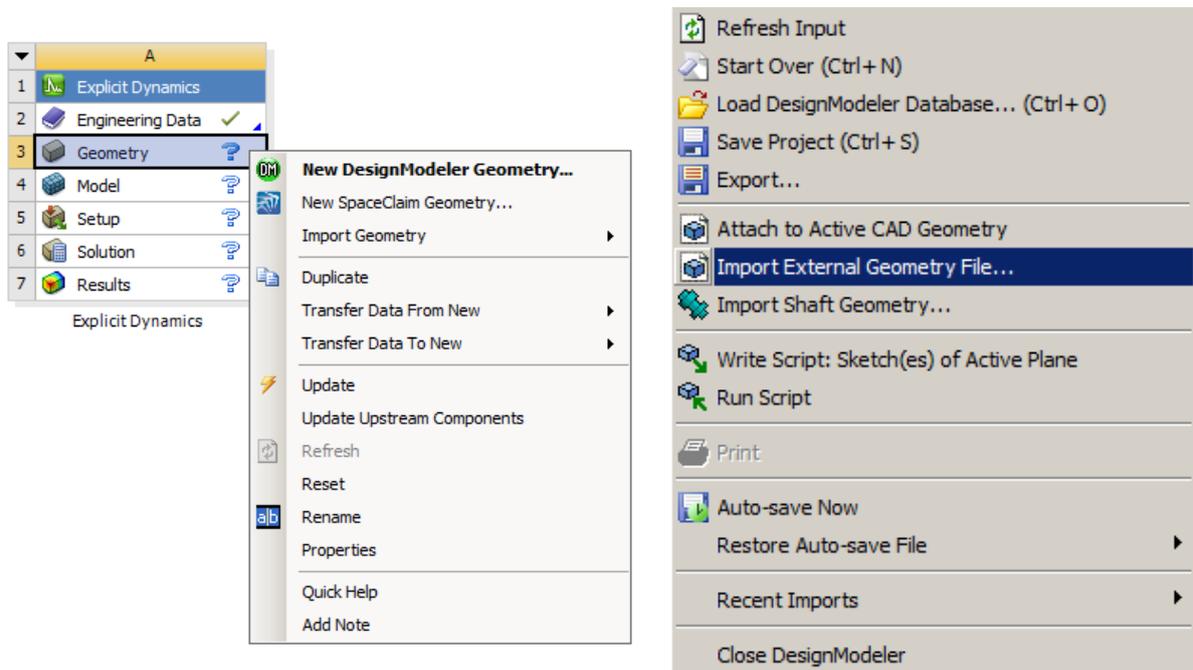
## 6.2 Uvoz 3D modela

Programski paket *ANSYS* omogućava kreiranje 3D modela, ali je za modele složene konfiguracije mnogo bolje rešenje kreiranje 3D modela u nekom od CAD programskih paketa. U tom slučaju vrši se uvoz modela u *ANSYS* neposredno ili posredno (*ANSYS Solutions*, 2016). U tabeli 6.2 prikazani su neki od CAD programskih paketa koji omogućavaju direktnu vezu sa *ANSYS*-om. U istoj tabeli mogu se videti i tipovi fajlova koji služe za tu vezu.

Tabela 6.2: CAD programski paketi koji omogućavaju direktnu vezu sa *ANSYS*-om

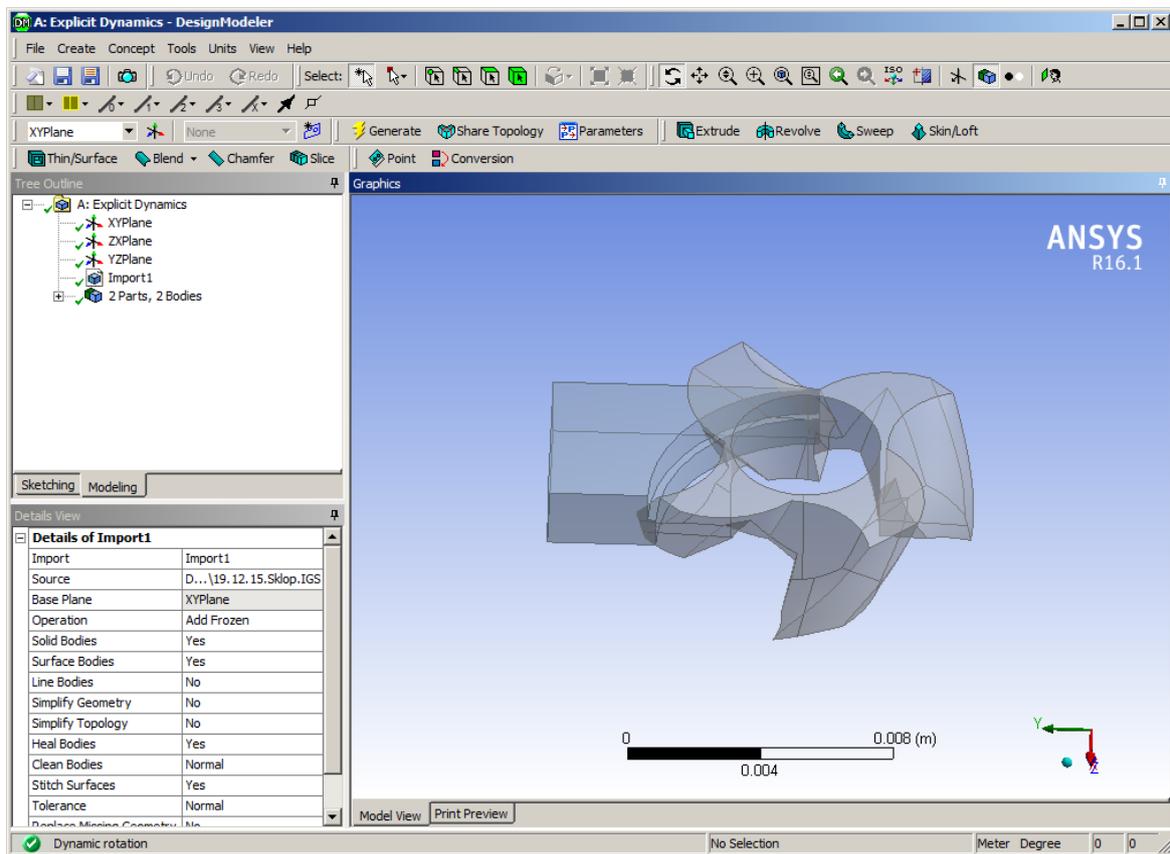
CAD programski paket	Tip fajla	Način ostvarivanja veze
CATIA V5	.CATPart ili CATProduct	CATIA Version 5
Pro/ENGINEER	.prt	Pro/ENGINEER
Unigraphics	.prt	Unigraphics
Parasolid	.x_t ili .xmt_txt	Parasolid
Solid Edge	.x_t ili .xmt_txt	Parasolid
SolidWorks	.x_t	Parasolid
Unigraphics	.x_t ili .xmt_txt	SAT
AutoCAD	.sat	SAT
Mechanical Desktop	.sat	SAT
SAT	.sat	SAT
Solid Designer	.sat	SAT

Za neposrednu vezu sa *ANSYS*-om koriste se neutralni standardni formati fajlova, IGES i STEP fajl. Na slici 6.14 prikazan je ulazak u *Design Modeler* i uvoženje modela koji je prethodno modeliran u programskom paketu *SolidWorks* i snimljen kao IGES fajl ( isti postupak se primenjuje i za STEP fajl).



Slika 6.14: Ulazak i uvoženje modela u *Design Modeler*

Da bi program uvezao modele (prikazani kao *Import1* u potprozoru *Tree Outline*) potrebno je odabrati komandu *Generate*. Na slici 6.15 su prikazani modeli uvezani u *Design Modeler*.

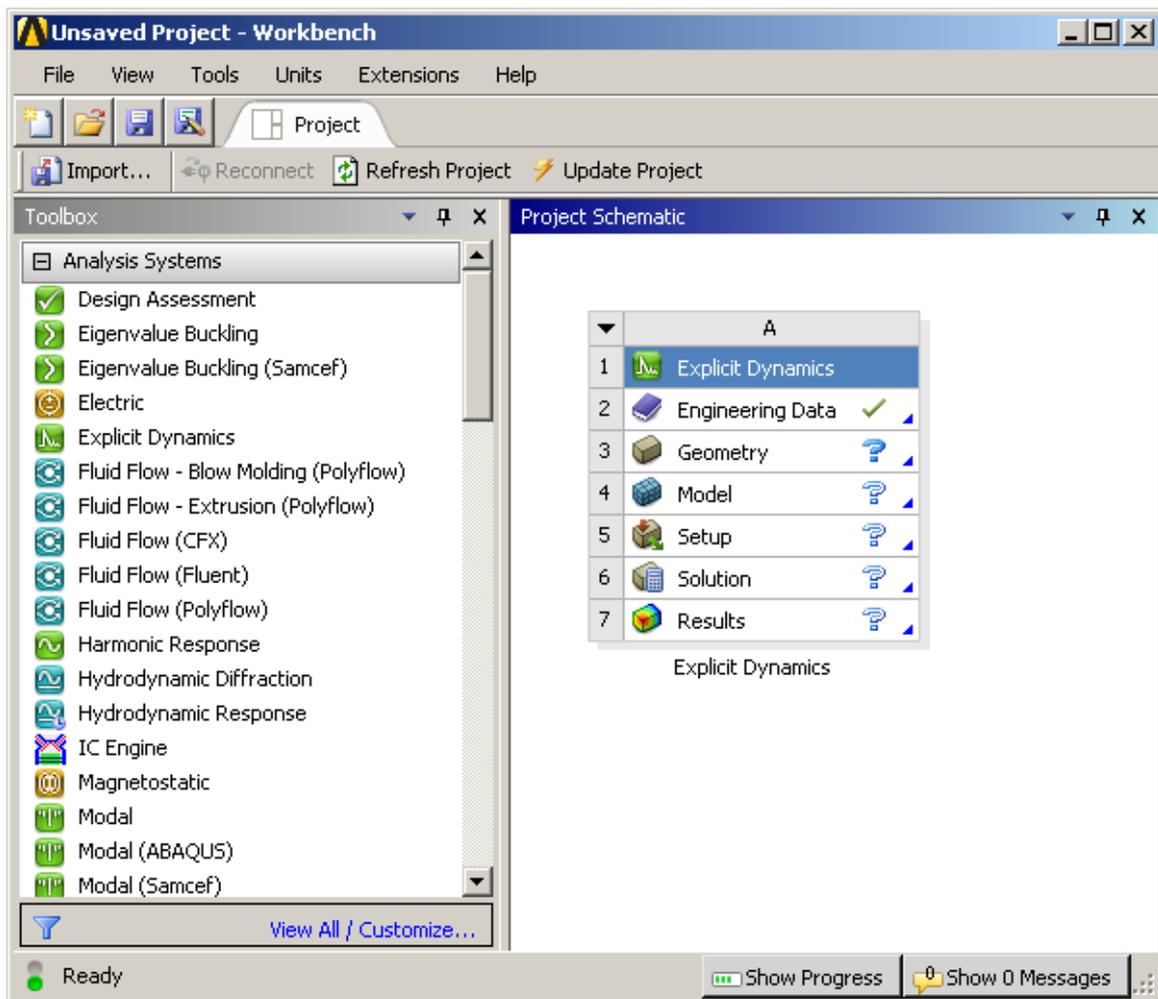


Slika 6.15: Izgled modela uvezanih u *Design Modeler*-u

### 6.3 Definisane materijala alata i obratka

Za simulaciju obrade glodanjem u programskom paketu ANSYS u meniju ANSYS *Workbench* izabran je mod *Explicit Dynamics*. ANSYS *Workbench* predstavlja glavni meni u kome se realizuju projekti i podjeljen je u dve glavne oblasti: *Toolbox* i *Project Schematic*. *Explicit Dynamics* se nalazi u *Toolbox*-u koji omogućava izbor četiri vrste analiza: *Analysis Systems* (sistemska analiza), *Component Systems* (komponente sistema), *Custom Systems* (prilagođeni sistemi) i *Design Exploration* (istraživanje dizajna).

Prebacivanjem moda *Explicit Dynamics* iz *Toolbox*-a u *Project Schematic* omogućava se pokretanje željenog projekta i snimanje projekta i njegovog radnog toka. *Project Schematic* omogućava vizuelno predstavljanje objekata u projektu i u njihovom međusobnom odnosu. Analiza je predstavljena kao sistem koji se sastoji od pojedinačnih ćelija (slika 6.16).

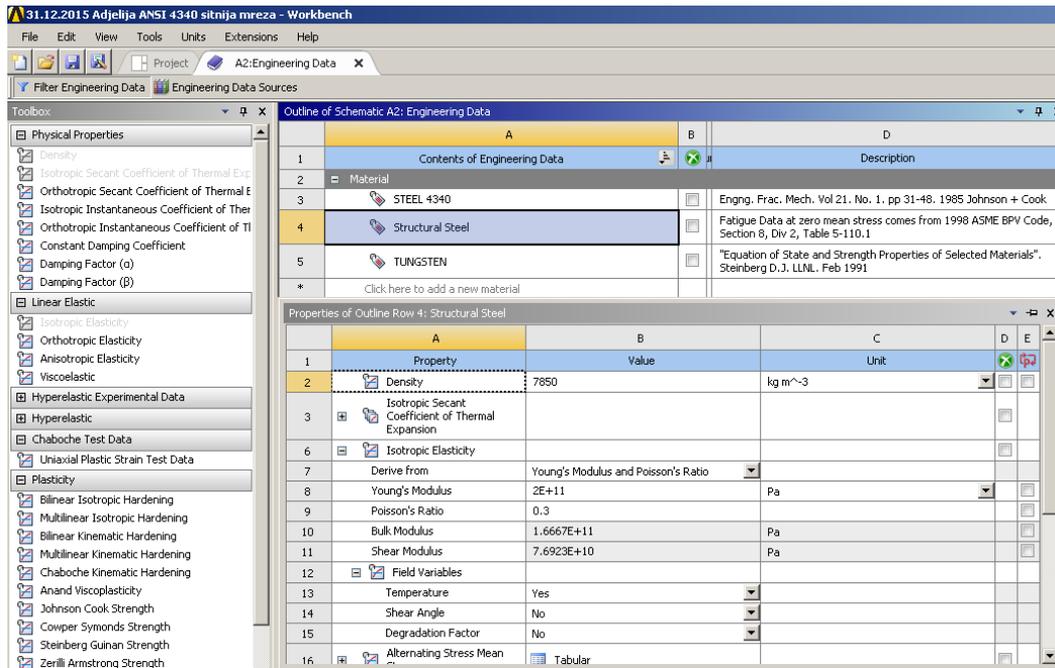


Slika 6.16: Izbor moda *Explicit Dynamics* u *Project Schematic*

Mod *Explicit Dynamics* sastoji se iz ćelija: *Engineering Data*, *Geometry*, *Model*, *Setup*, *Solution* i *Results*. *Engineering Data* je ćelija u kojoj se vrši izbor materijala. Standardni materijal je konstrukcioni čelik i on se nalazi u opciji po defaultu. Kada se sa desne strane ćelije nalazi znak pitanja to znači da ta ćelija nije definisana. Neophodno je pratiti redosled unošenja podataka kako bi ćelije bile čekirane.

Pre izbora odgovarajućeg materijala za alat i obradak poželjno je izabrati u meniju *File / Units* odgovarajuće jedinice u kojima se radi (npr, mm, kg, N, s, mV, mA). U biblioteci materijala koja se nalazi unutar ćelije *Engineering Data* vrši se izbor materijala. Treba naglasiti da postoji mogućnost i unosa novih materijala u biblioteku.

Do podataka o materijalima se dolazi duplim klikom na *Engineering Data*, kada se otvara nekoliko potprozora. U potprozoru *Engineering Data Sources* odabere se *Explicit Materials* i izaberu materijali alata i obratka. U potprozoru *Outline of Schematic A2: Engineering Data* mogu se videti odabrani materijali iz biblioteke materijala (slika 6.17).

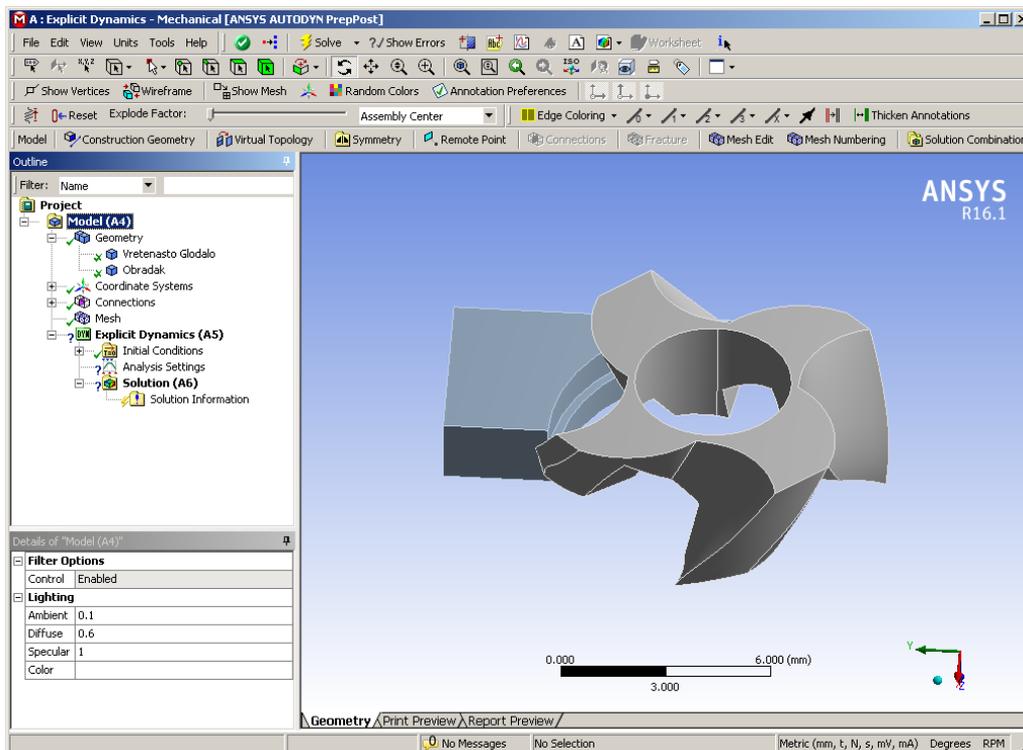


Slika 6.17: Izabrani materijali u Engineering Data

Nakon izbora materijala, za vraćanje na projekat koristi se komanda *Project* koja se nalazi pored osnovnih komandi u *Workbench*-u.

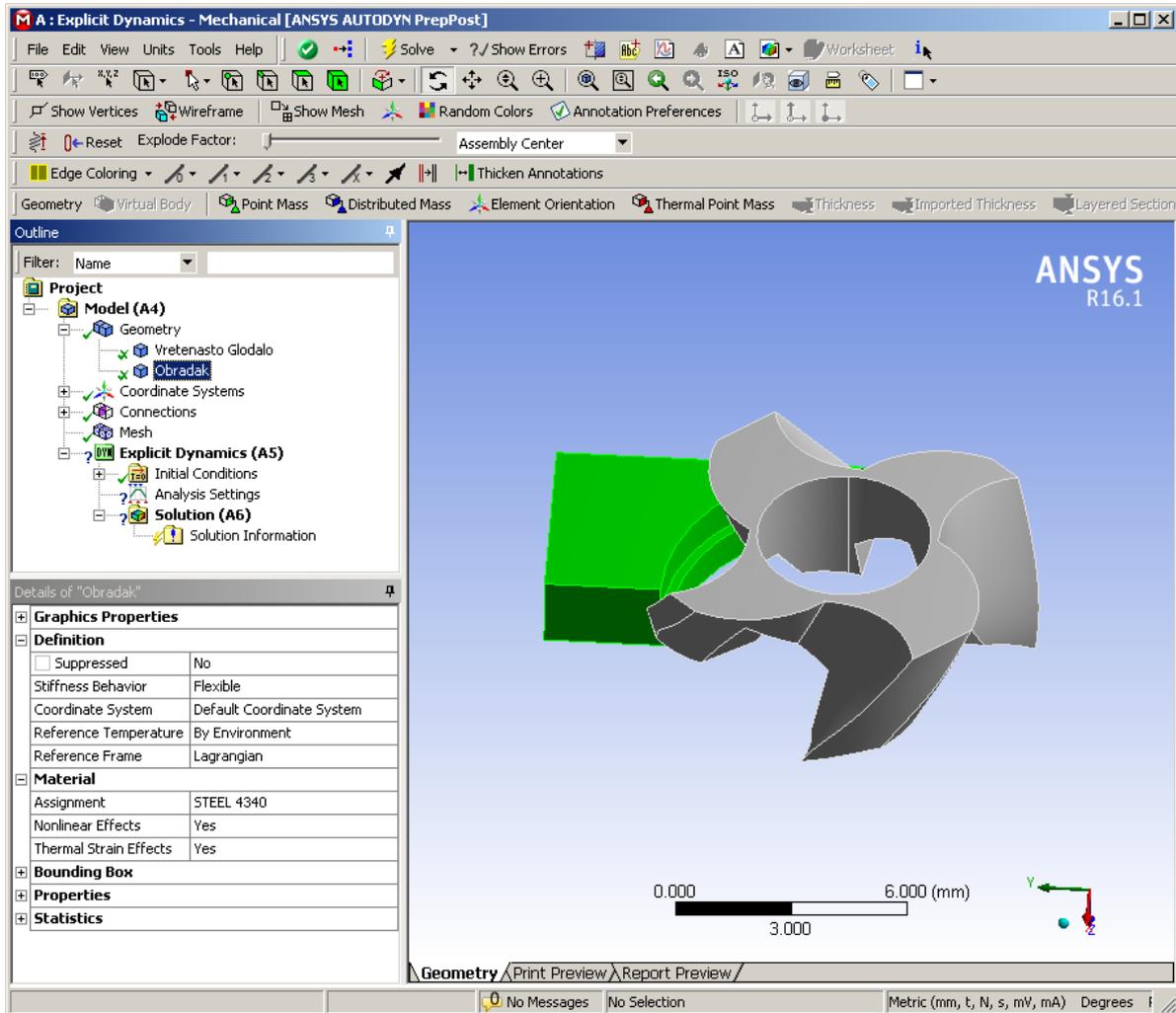
#### 6.4 Definisane parametara za simulaciju obrade glodanjem

Kada se uvezu modeli i izaberu odgovarajući materijali modela, potrebno je pokrenuti podprogram *Mechanical* u kome se definišu *Model*, *Setup*, *Solution* i *Results*. Na slici 6.18 prikazan je izgled modela alata i obratka u *Mechanical*-u.



Slika 6.18: Izled modela alata i obratka u Mechanical-u

Na levoj strani prozora u polju *Outline* može se videti koliko je modela uvezeno. Kada se na stablu u polju *Outline* selektuje jedan od modela, u polju ispod mogu se videti detalji koji se odnose na taj model. Modelu se može promeniti ime, izabrati materijal, definisati da li je krut ili fleksibilan, odabrati odgovarajući koordinatni sistem za model i definisati temperatura u početnom položaju (slika 6.19).

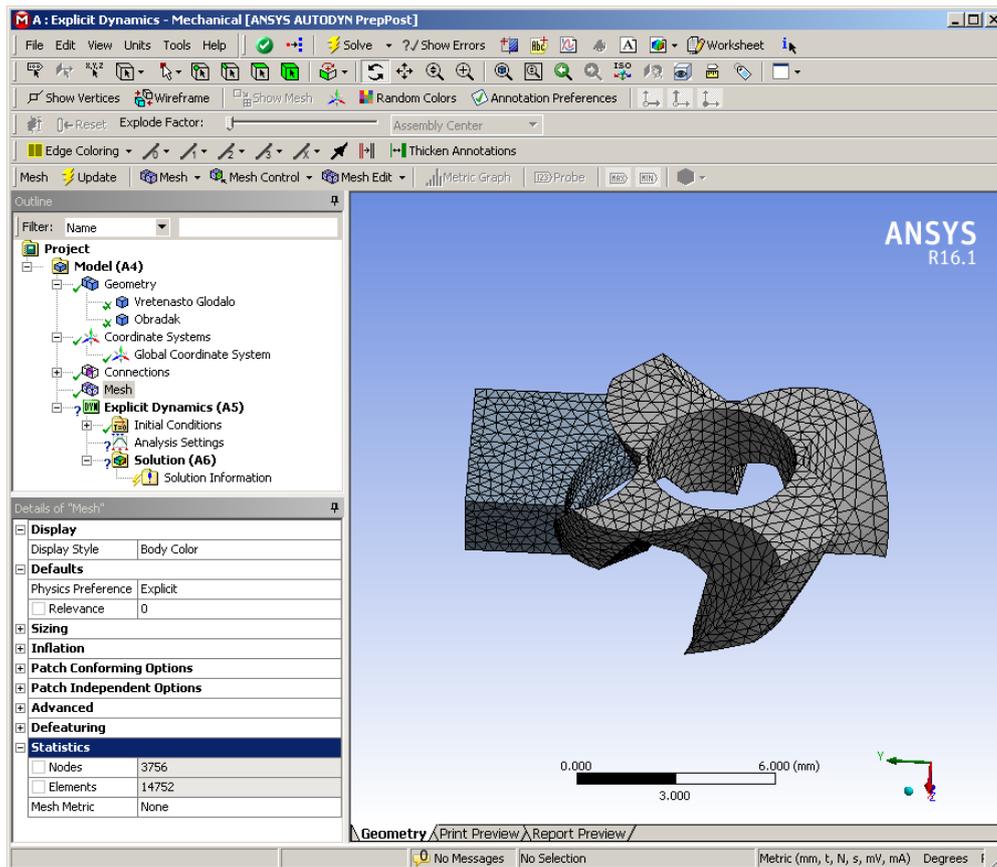


Slika 6.19: Izbor Geometry sa detaljima obratka

Nakon definisanja geometrije modela potrebno je definisati koordinatne sisteme. Globalni koordinatni sistem se ne menja, dok se za svaki model posebno može kreirati novi koordinatni sistem, koji je nezavistan od globalnog koordinatnog sistema.

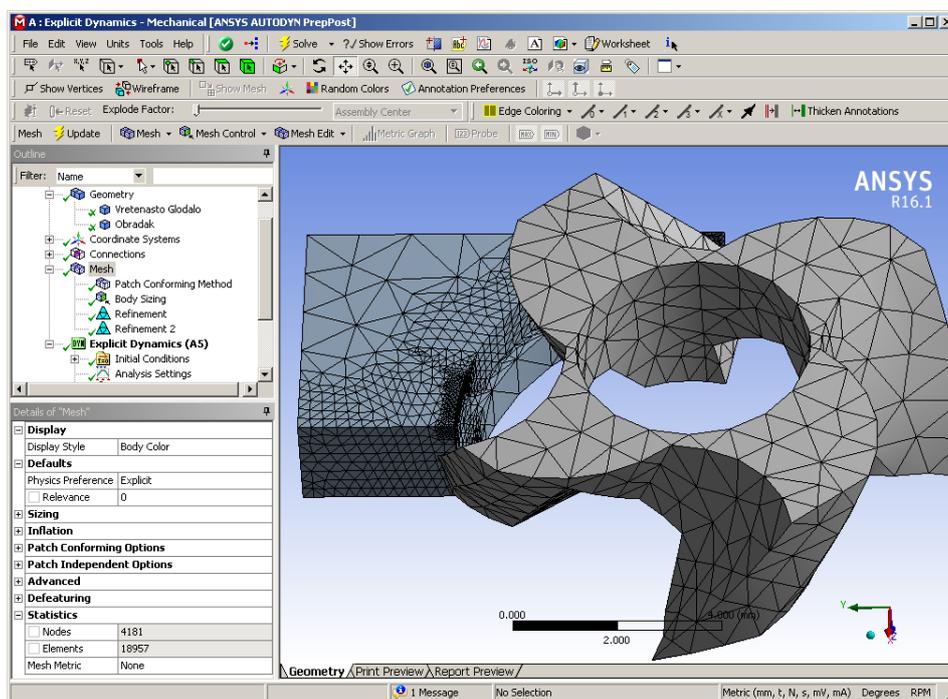
Veza između modela definiše se u okviru komande *Connections*. U slučaju kada modeli pre simulacije nisu u kontaktu ova komanda se ne definiše.

Za definisanje mreže konačnih elemenata ANSYS automatski generiše mrežu (slika 6.20). Osim formiranja standardne mreže postoji niz različitih mogućnost definisanja mreže pri čemu se može odabrati metoda formiranja mreže, kao i veličina mreže na određenim delovima modela ili na celom modelu. Nakon izbora tipa i veličine mreže, za prikazivanje mreže potrebno je izabrati komandu *Generate Mesh*.



Slika 6.20: Automatski generisana mreža

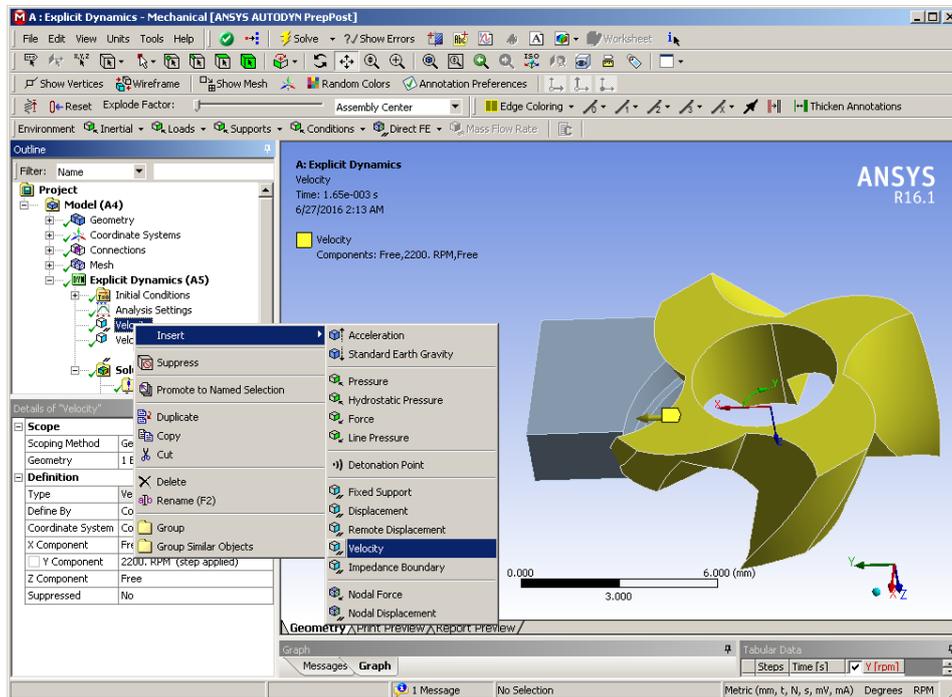
Na tačnost rezultata simulacije, kao i na vreme potrebno da se simulacija obradi, najveći uticaj ima izbor tipa mreže (slika 6.21) i krupnoća mreže. Ovaj izbor umnogome zavisi od same geometrije modela za simulaciju, jer što je geometrija modela složenija to je pravilan izbor mreže značajniji.



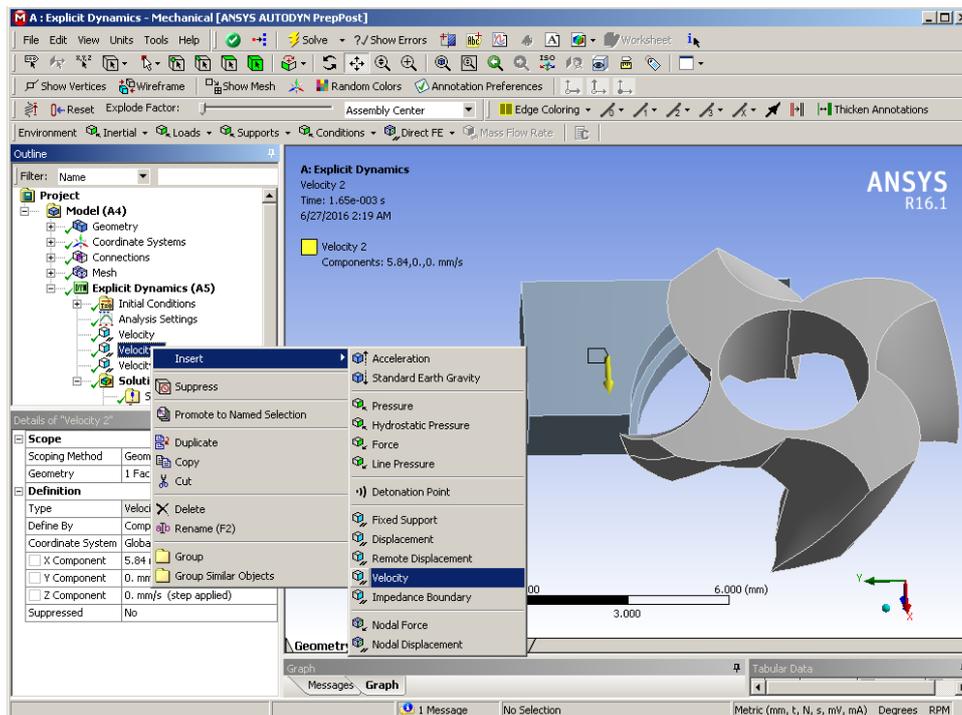
Slika 6.21: Izbor odgovarajućeg tipa mreža

Na slikama 6.20 i 6.21 može se videti razlika između automatski formirane mreže i mreže formirane korišćenjem komande *Patch Conforming Method, Body Sizing* i *Refinement*. Može se primetiti da je mreža na obratku u zoni obrade mnogo gušća u odnosu na ostali deo obratka. Takođe, može se primetiti da je uvećanje neznatno s tim da je mreža obratka na pojedinim delovima gušća.

Nakon definisanja mreže, potrebno je definisati kretanja alata i obratka. Kretanje alata i obratka definisano je izborom komande *Explicit Dynamics/Insert/Velocity* (slika 6.22 i 6.23).

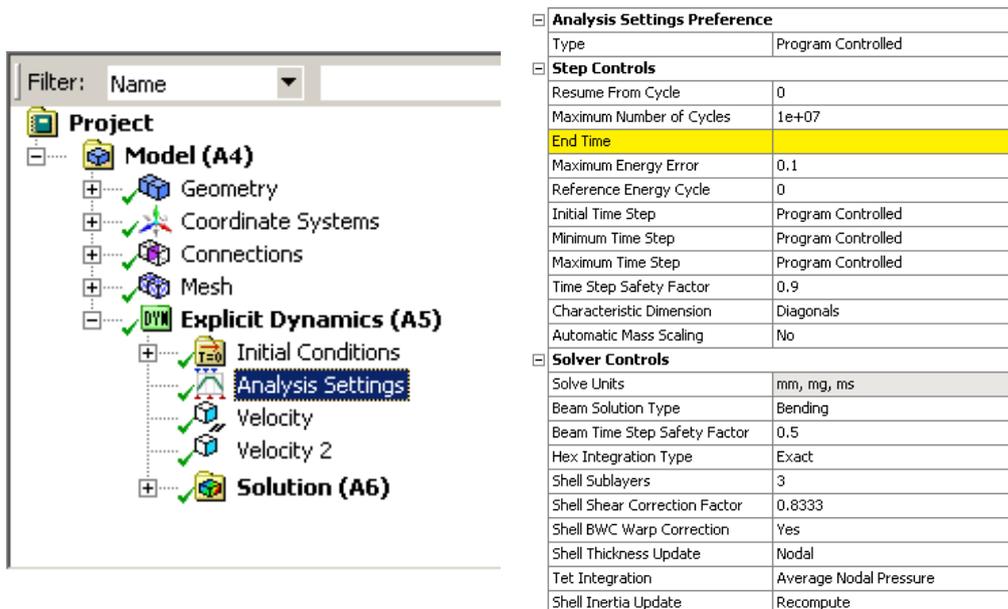


Slika 6.22: Definisanje kretanja alata



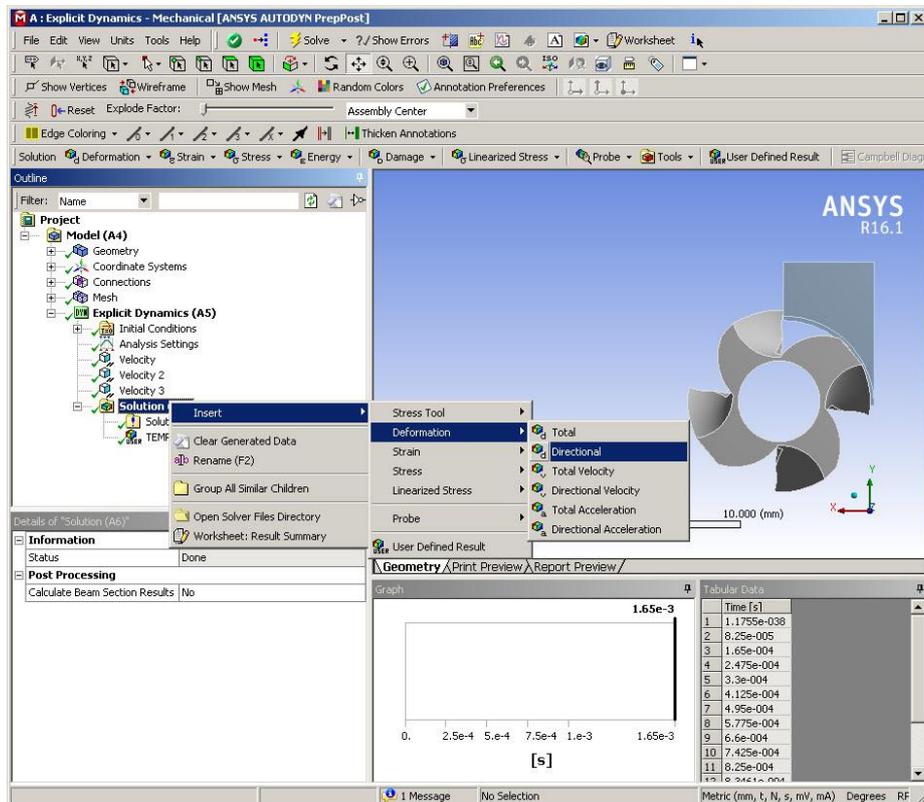
Slika 6.23: Definisanje kretanja obratka

Da bi simulacija mogla da se pokrene neophodno je podesiti vreme trajanja simulacije u *Explicit Dynamics/Analysis Settings /Step Controls/ End Time* (slika 6.24).



Slika 6.24: Definisanje vremena trajanja simulacije

Nakon definisanja prethodnih parametara, potrebno je izabrati vrste željenih rezultata. U programskom paketu ANSYS može se vršiti ispitivanje deformacija, elastičnosti, napona, momenata, ubrzanja, sile, mase... Na slici 6.25 prikazana je jedna od putanja za izbor vrste ispitivanja *Solution/Insert/ Deformation/ Directional*.



Slika 6.25: Izbor vrste rezultata

Osim ponuđenih rezultata, izborom opcije *User Defined Result* korisnici mogu sami definisati željene rezultate. U ovom radu izborom opcije *User Defined Result*, kao željeni rezultat definisana je temperatura.

## 6.5 Računarska obrada simulacije

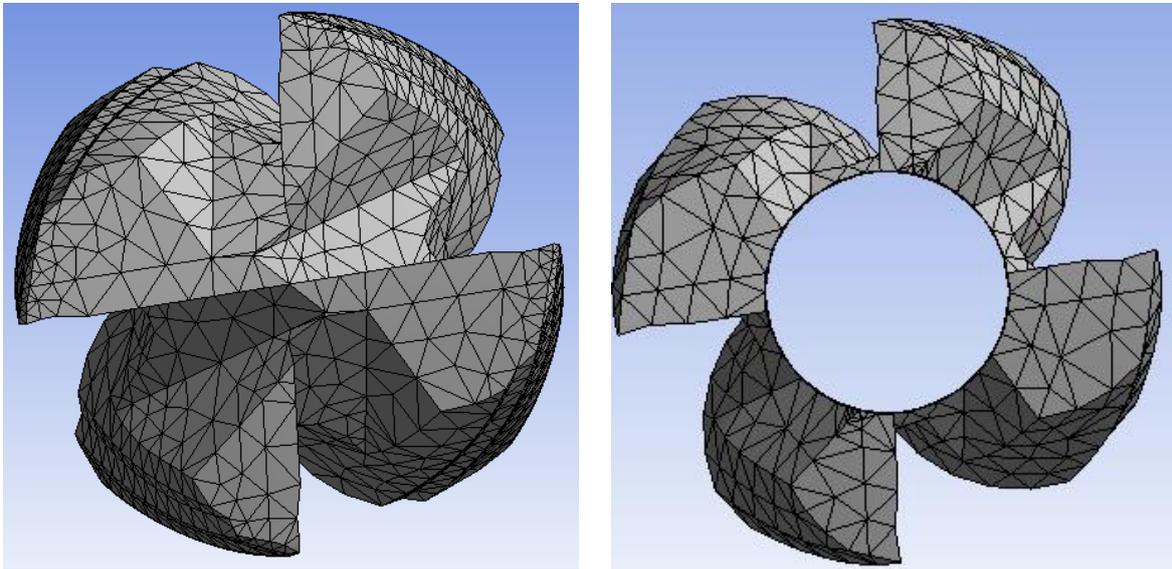
Za pokretanje programa, kako bi obradio simulaciju, potrebno je izabrati ikonu *Solve* koja se nalazi na glavnom meniju.

## 6.6 Prikaz i analiza rezultata simulacije

Prikaz i analiza simulacije opisana je na primeru vretenstog glodanja sa izabranim režimom obrade.

### 6.6.1 Simulacija vretenastog glodanja sa izabranim režimom obrade

Za simulaciju obrade glodanjem u programskom paketu *ANSYS* napravljen je model vretenastog glodala i obratka u *SolidWorks*-u (Mitrović, 2016a). Nakon toga, još jedan pojednostavljen model vretenastog glodala i obratka je napravljen 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 IGES fajlovi i uvezeni u *ANSYS Explicit Dynamics*. Na slici 6.26 prikazani su modeli glodala sa i bez pojednostavljenja u *ANSYS*-u.



Slika 6.26: Postavka modela glodala različite složenosti uvezenih u *ANSYS*

Za materijal obratka izabran je čelik AISI 4340 iz biblioteke materijala *Explicit Materials*, dok su za materijal vretenastog glodala, tvrdi metal, uneti potrebni podaci jer ne postoje u biblioteci materijala. U simulacijama obrade za ponašanje materijala obratka izabran je klasičan Džonson-Kuk konstitutivni model materijala (Johnson i Cook, 1983). Ponašanje materijala čelika AISI 4340 je definisano prema Džonson-Kuk zakonu kao:

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_m - \theta_r} \right)^m \right] \quad (7.1)$$

gde  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\dot{\varepsilon}$  predstavljaju napon, deformaciju i stepen deformacije i  $\Theta$ ,  $\Theta_r$ ,  $\Theta_m$  je trenutna temperatura radnog materijala, sobna temperatura i temperatura topljenja materijala,

respektivno. A, B, C, n i m su konstante materijala. Parametri materijala AISI 4340 (Alcaraz i dr., 2003) definisani prema Džonson-Kuk zakonu prikazani su u tabeli 6.3.

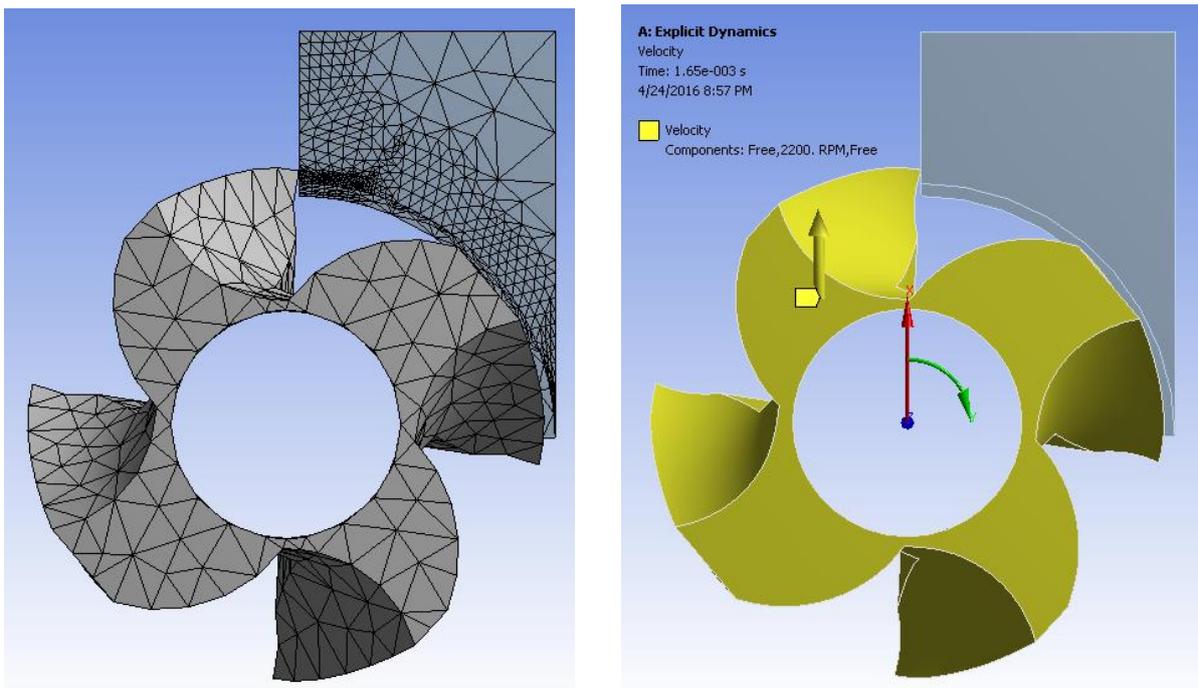
Tabela 6.3: Parametri čelika AISI 4340 definisani prema Džonson-Kuk zakonu

A(MPa)	B(MPa)	C	m	n	$\dot{\epsilon}_0$	$\Theta_m (^{\circ}\text{C})$	$\Theta_r (^{\circ}\text{C})$
1150	739	0.014	1.03	0.26	1	1450	20

Kao što je već prethodno objašnjeno prilikom definisanja parametara za simulaciju potrebno je definisati: modele, koordinatne sisteme, povezanost, umrežavanje modela, kretanja alata i obratka, trajanje simulacije i izbor izlaznih rezultata. Za svaki model potrebno je definisati da li je krut ili fleksibilan. Izabrano je da su glodalo i obradak fleksibilni. Zadržan je globalni koordinatni sistem i definisan koordinatni sistem za glodalo. U početnoj fazi simulacije glodalo i obradak su razdvojeni tako da nije definisana povezanost modela. Za definisanje graničnih uslova simulacije korišćen je Lagranžov model.

Dve simulacije su pokrenute, pri čemu je u prvoj simulaciji korišćen složeniji model glodala, dok je u drugoj simulaciji korišćeno glodalo sa pojednostavljenjem. U pojednostavljenoj simulaciji mreža je automatski formirana tako da glodalo i obradak imaju ukupno 12520 elemenata i 2964 čvorova. U drugoj simulaciji mreža na obratku je formirana korišćenjem komande *Refinement* tako da se povećao broj elemenata i čvorova i u ovom slučaju glodalo i obradak imaju ukupno 18957 elemenata i 4181 čvorova. Ulazni parametri za simulaciju odgovaraju režimu obrade iz eksperimenta (tabela 5.5, redni broj 12): brzina rezanja  $v = 1,15 \text{ m/s}$ ; korak po zubu  $s_z = 0,028 \text{ mm/z}$  i dubina rezanja  $a = 1 \text{ mm}$ . Kao izlazna performansa simulacije izabrana je temperatura rezanja.

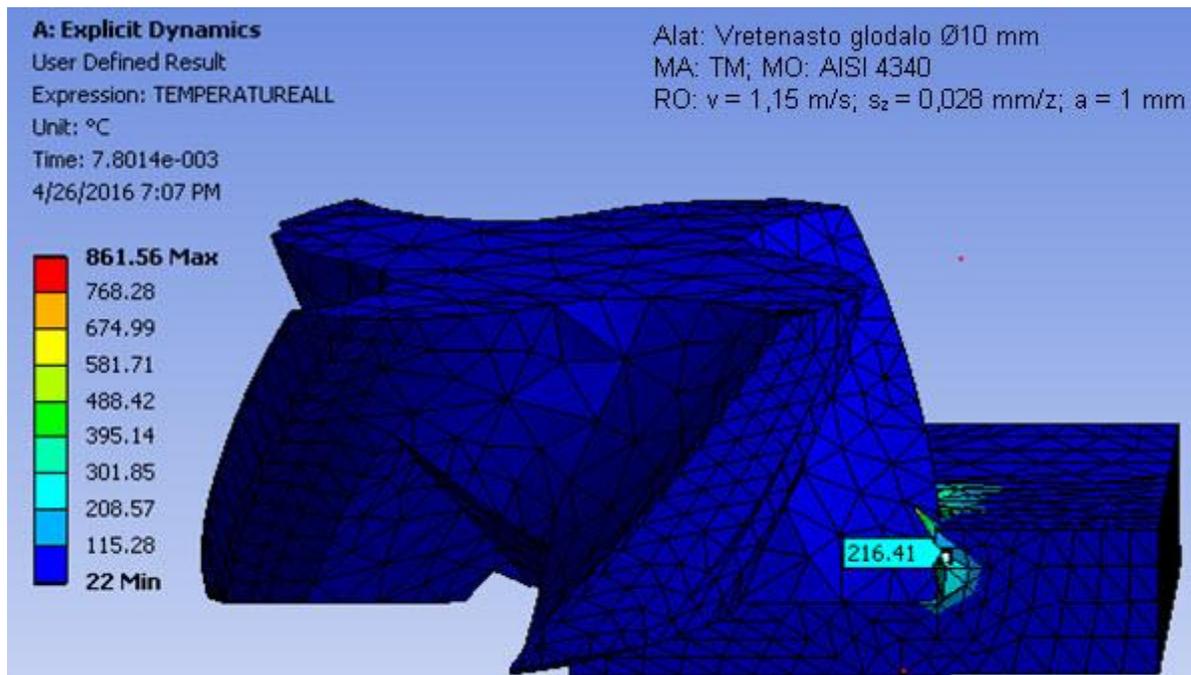
Na slici 6.27 prikazan je pojednostavljen model glodala i obratka nakon definisanja mreže i nakon definisanja kretanja u ANSYS-u.



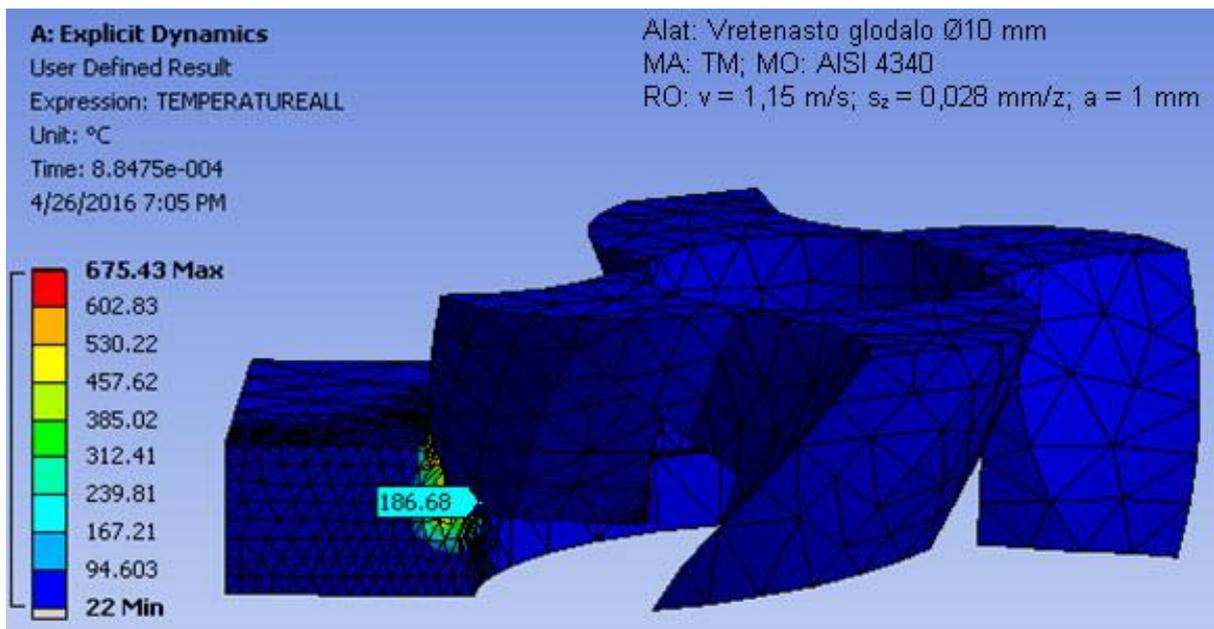
Slika 6.27: Modeli glodala i obratka nakon umrežavanja i definisanja kretanja u ANSYS-u

Rezultati simulacija obrade glodanjem sa raspodelom temperature prikazani su na slikama 6.28 i 6.29. Poređenjem rezultata dobijenih u simulacijama može se videti da se u

simulaciji sa složenijim modelom glodala dobijaju više vrednosti temperature u zoni rezanja. Jedan od razloga za to je što je preciznost rezultata simulacije u osnovi funkcija veličine elemenata. Generalno posmatrano, što su manji elementi mreže to su precizniji rezultati, ali to zahteva i mnogo više vremena da se urade proračuni.

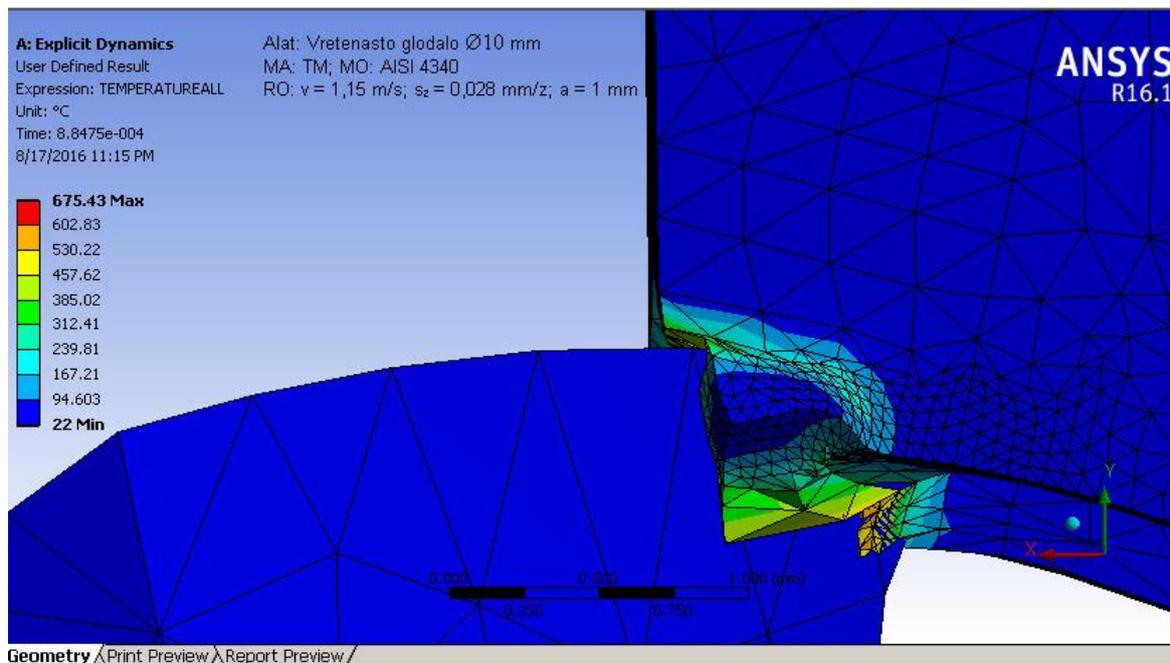


*Slika 6.28: Raspodela temperature u simulaciji sa složenijim modelom glodala*



*Slika 6.29: Raspodela temperature u simulaciji sa pojednostavljenim modelom glodala*

Na slici 6.30 dat je uvećan prikaz (u pogledu odozgo) u kome se može videti kako zub glodala ulazi u zahvat, za slučaj simulacije sa pojednostavljenim modelom glodala.



Slika 6.30: Detalj ulaska zuba u zahvat sa pojednostavljenim modelom glodala

Računarsko vreme potrebno za obradu simulacije sa složenim modelom glodala iznosilo je 14 dana a za drugu simulaciju 7 dana na HP xw8600 radnoj stanici sa 2 x CPU procesora sa 4 fizička jezgra svaki, što znači ukupno 8 fizičkih jezgara i 16 GB RAM-a.

Na osnovu dobijenih rezultata simulacija obrade glodanjem u *ANSYS/Explicit Dynamics*-u za predviđanje temperatura u zoni rezanja uočavaju se određena ograničenja i problemi, od kojih su najrelevantniji sledeći:

- glavni problem u simulaciji obrade glodanjem je umrežavanje obratka kao i precizno modeliranje geometrije i umrežavanje glodala;
- previše gusta mreža bitno utiče na povećanje vremena obrade simulacije.

U tom kontekstu, postojanje ograničenja i problema u *ANSYS/Explicit Dynamics*-u otežavaju i skoro onemogućavaju pouzdanu analizu temperature u zoni rezanja za simulacije obrade glodanjem u ovom programskom paketu. Iz tih razloga se dobijeni rezultati odbacuju i u daljem radu ne analiziraju.

## 7 SIMULACIJA TOPLOTNIH POJAVA PRI GLODANJU U PROGRAMSKOM PAKETU *ADVANTEDGE*

U skladu sa metodologijom opisanom u prethodnom poglavlju kreirana je simulacija procesa obrade glodanjem u programskom paketu *AdvantEdge*.

### 7.1 Izrada 3D modela vretenastog glodala u programskom paketu *SolidWorks*

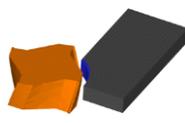
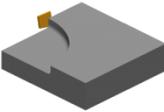
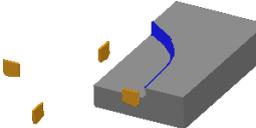
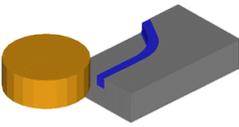
Za simulaciju obrade u programskom paketu *AdvantEdge* korišćen je 3D model vretenastog glodala čiji je postupak izrade objašnjen u tački 6.1 rada.

### 7.2 Uvoz 3D modela

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* omogućava uvoz modela iz nekog od odgovarajućih CAD programskih paketa posredstvom neutralnih standardnih tipova fajlova. Za uvoz alata mogu se koristiti STL i VRML fajlovi, dok se za istovremeni uvoz alata i obratka mogu koristiti STEP fajlovi. U tabeli 7.1 prikazano je koje vrste fajlova mogu biti uvezene u zavisnosti od vrste glodanja.

Tabela 7.1: Formati fajlova koji omogućavaju uvoz 3D modela

Format fajla / vrsta glodanja	STL	VRML	STEP	Format fajla / vrsta glodanja	STL	VRML	STEP
	X	X	X		X	X	X
	X	X	X		/	/	X
	/	/	X		X	X	X

*AdvantEdge* poseduje *STEP Analyzer* koji omogućava posmatranje uvezenih alata (*Tools / Import Tool / STEP Tool File*) i obradaka (*Workpiece / Import Workpiece / STEP Workpiece File*). Ova funkcija omogućava otvaranje bilo kog STEP fajla izvezenog iz komercijalnih CAD sistema i njihov pregled u *AdvantEdge* okruženju. U tabeli 7.2 prikazane su mogućnosti uvoza STEP fajlova alata i obratka u *AdvantEdge*-u.

Tabela 7.2: Mogućnosti uvoza 3D STEP fajlova alata i obratka u AdvantEdge-u

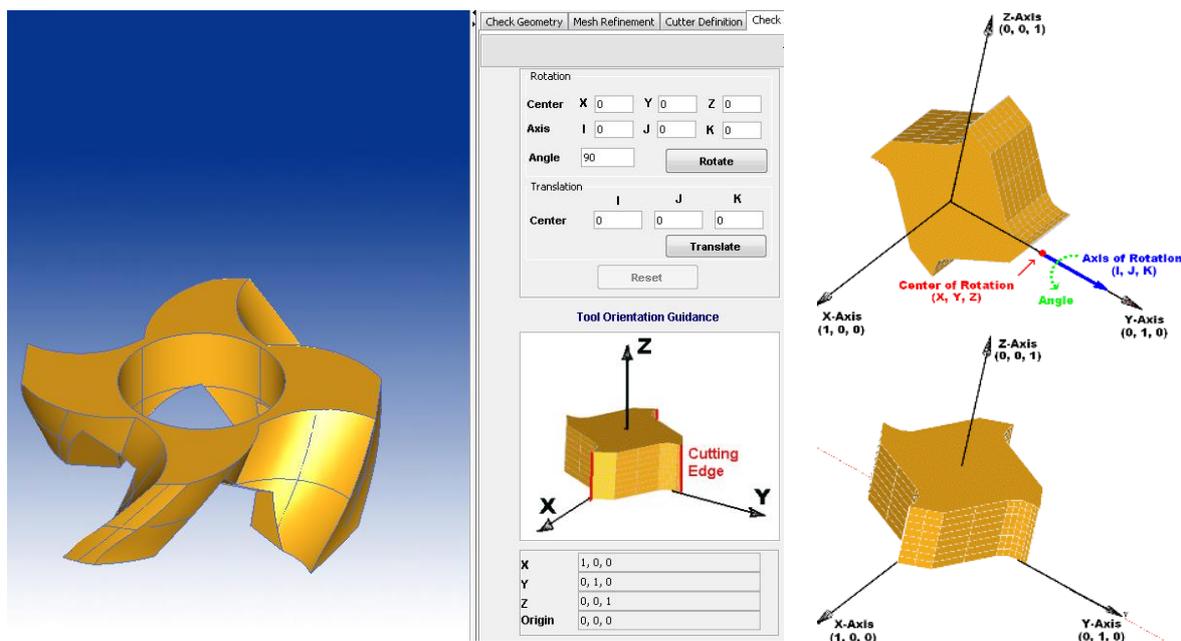
	Standardni obradak	Uvezeni obradak
Uvoz standardnog alata	X	/
Uvoz samo alata	X	/
Uvoz alata i obratka	X	X

STEP standardni fajl za razmenu podataka definisan je kao neutralan fajl format za predstavljanje geometrije modela i zahteva da geometrija bude predstavljena kao granična prezentacija (*Boundary REPresentation*). Odgovarajući STEP fajlovi koji se nalaze u bilo kom direktorijumu mogu se otvoriti u *AdvantEdge*-u.

Uvoz samo alata je podrazumevana opcija prilikom uvoza STEP fajlova. Ova opcija omogućava da se uveze jedna geometrija sa STEP fajlom i definišu odgovarajući parametri. Jednom uvezeni alat sa izmenjivim pločicama ili zapreminski model može da se rotira i pomera u *STEP Analyzer*-u (slika 7.1).

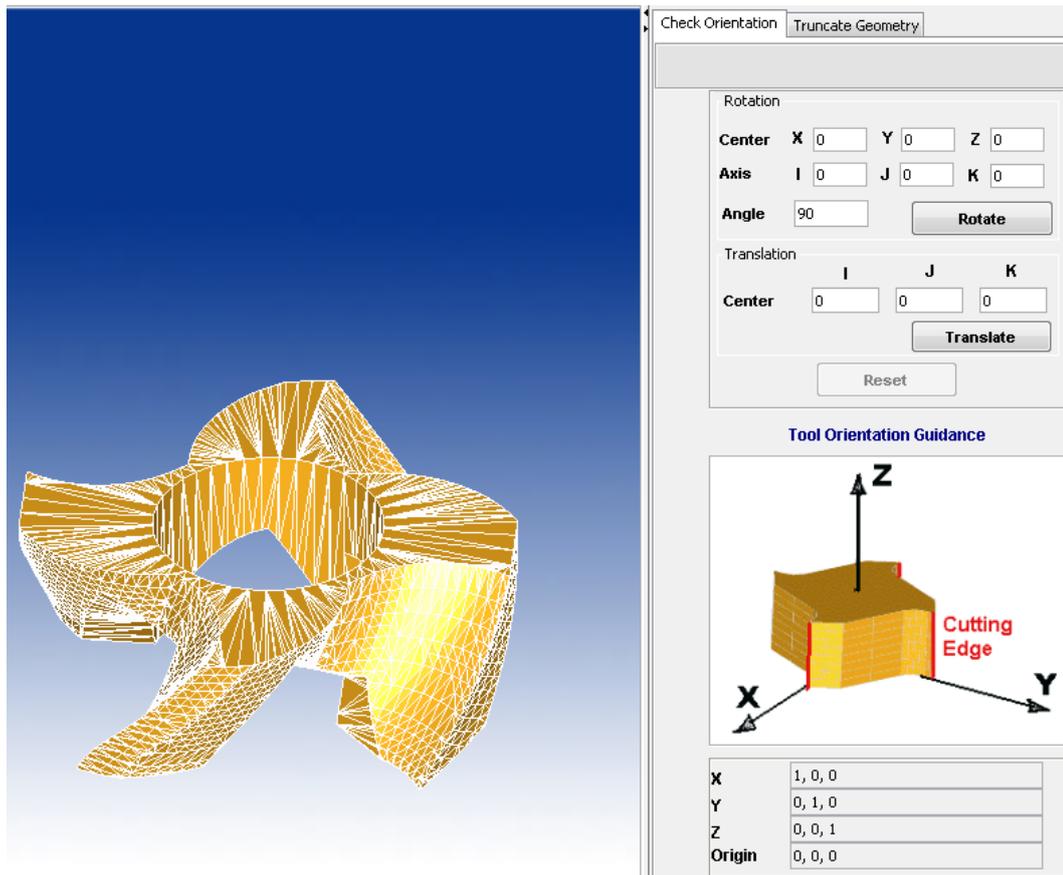
Za uvoz 3D zapreminskih modela glodala, kao i sklopova glodala sa obratkom koristi se kartica *Tool-Workpiece Import* prilikom uvoza STEP fajla. Za ove alate uvezeni fajlovi su odmah umreženi bez transformacija koordinata od strane korisnika ili ponavljanja parametara za veći broj pločica. Od korisnika se očekuje da obezbedi relativno pravilno pozicioniranje i orijentaciju između većeg broja pločica. Za pravilno pozicioniranje *AdvantEdge* zahteva da se alat orijentiše tako da se osa rotacije alata poklapa sa Z-osom.

Kada se jednom izabere STEP fajl za uvoz, sadržaj odabranog fajla se automatski kopira na lokalni direktorijum projekta sa nazivom *projectname.stp*. Ovaj novi fajl će se koristiti kao osnova za sve sledeće simulacije. Promene u STEP fajlu se primenjuju isključivo na ovaj novi fajl, što ne utiče na originalni STEP fajl.



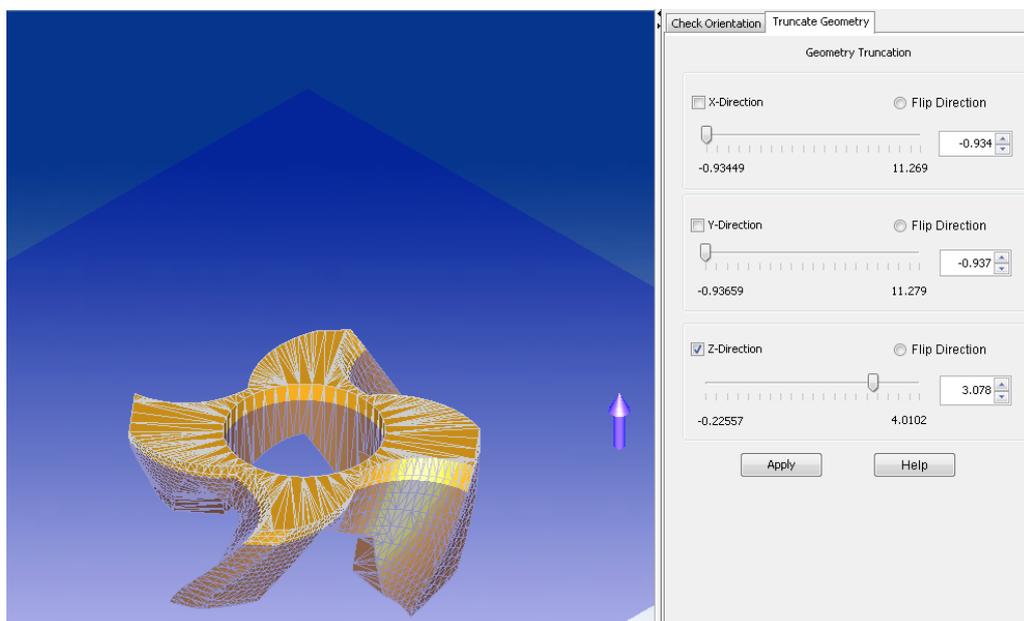
Slika 7.1: Rotacija modela u STEP Analyzer-u

STL i VRML fajlovi koji trouglastim površinama opisuju generisan zapreminski model mogu se koristiti za uvoz alata. Nakon uvoza alata u *AdvantEdge* odmah se može videti orijentacija i oblik alata kako bi se osiguralo pravilno podešavanje (slika 7.2).



Slika 7.2: Provera orijentacije alata

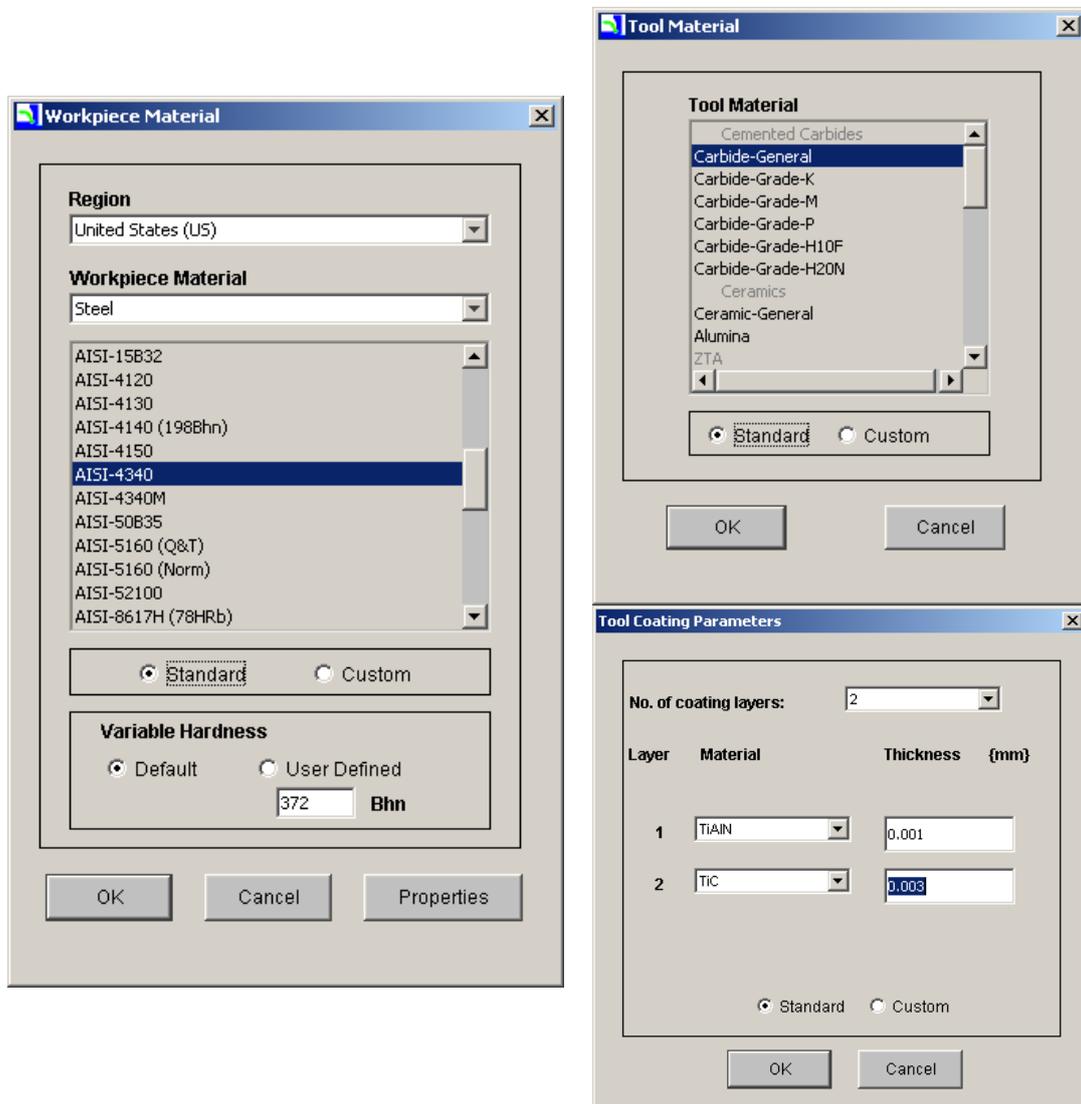
Alat se takođe može i skratiti duž određenog pravca čime se smanjuje vreme potrebno za simulaciju (slika 7.3).



Slika 7.3: Skraćenje alata u pravcu Z-ose

### 7.3 Definisanje materijala alata i obratka

Programski paket *AdvantEdge* poseduje biblioteku sa velikim brojem standardnih materijala koji se mogu koristiti za definisanje materijala obratka, materijala alata i materijala prevlake. U meniju *Tools* vrši se izbor materijala alata i prevlake (slika 7.4), a u meniju *Workpieces* izbor materijala obratka. Hemijski sastav i osobine standardnih materijala navedeni su u meniju prozora materijala alata i obratka. Kada se koristi alat sa prevlakom definiše se debljina i broj slojeva prevlake (najviše tri sloja). U *AdvantEdge*-u postoji i mogućnost unosa novih materijala u biblioteku.

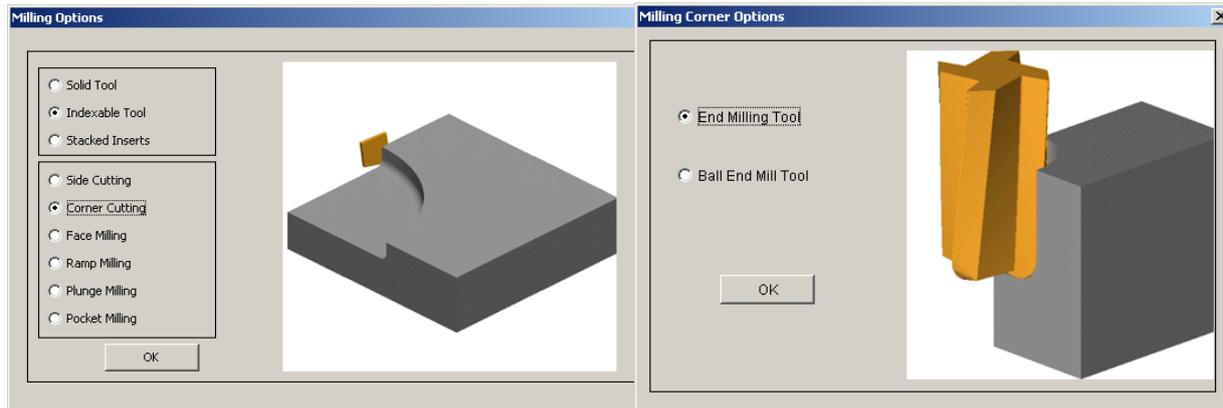


Slika 7.4: Prozori za izbor materijala obratka, alata i prevlake

### 7.4 Definisanje parametara za simulaciju obrade glodanjem

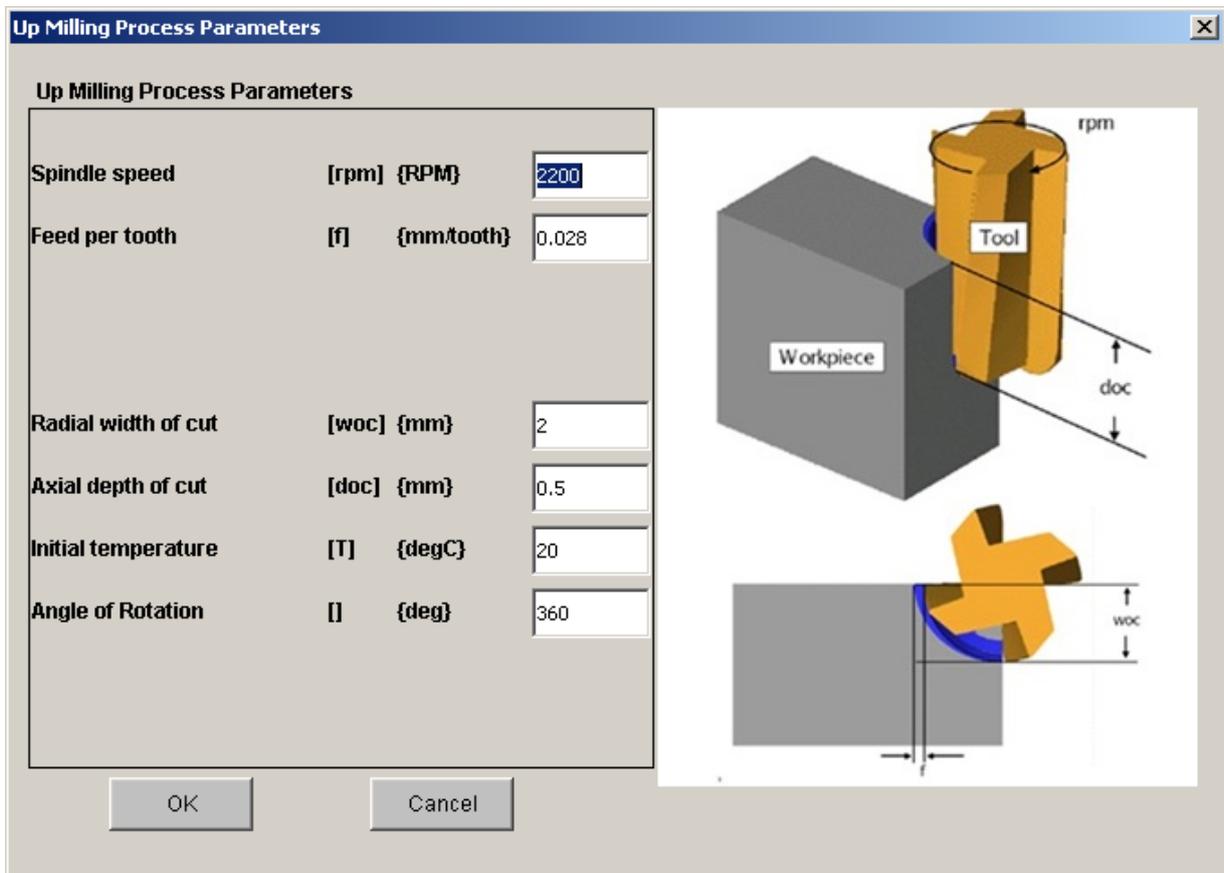
U programskom paketu *AdvantEdge*-u simulacija može da se pokrene u demonstracionom ili standardnom modu. Podrazumevan i preporučen je standardni mod. Demonstracioni mod rada smanjuje vreme za obradu simulacije, ali pruža manje pouzdane rezultate. Standardne simulacije su pouzdanije, tačnije i stabilnije od demonstracionih simulacija.

Nakon izbora vrste obrade rezanjem u *AdvantEdge*-u potrebno je odabrati odgovarajući alat za tu vrstu obrade (slika 7.5).



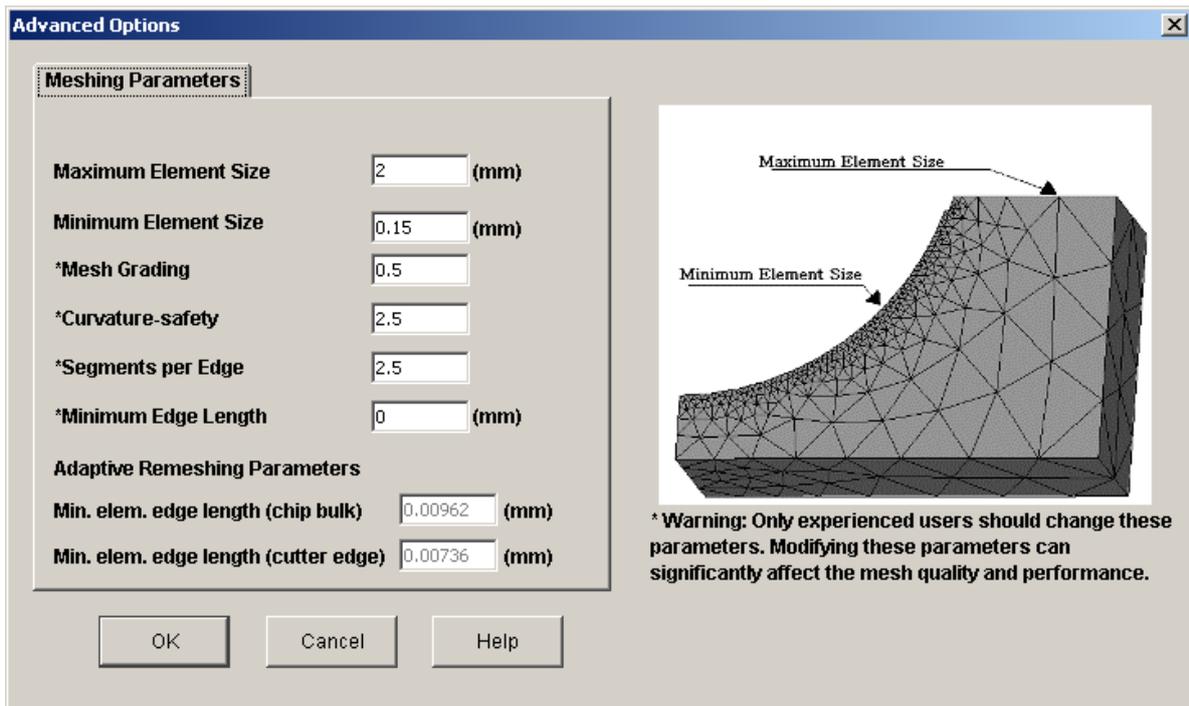
Slika 7.5: Izbor vrste obrade i vrste alata u *AdvantEdge*-u

Za obradu stepenastih površina vretenastim glodalom (za slučaj suprotnosmernog glodanja) ulazni parametri kao što su broj obrtaja, korak po zubu, širina i dubina rezanja unose se u prozoru *Process Parameters* (slika 7.6).



Slika 7.6: Prozor *Up Milling Process Parameters*

Za 3D simulacije u *AdvantEdge*-u u okviru opcije *Create/Edit Standard Workpiece/Advanced Options/Meshing Parameters* postoji podrazumevani obradak koji sadrži odgovarajuće parametre mreže (slika 7.7). Inicijalni parametri mreže definišu preliminarnu mrežu pre nego što počne simulacija, zahvataju originalnu geometriju i definišu polazne tačke za parametre prilagođenog ponovnog umrežavanja.

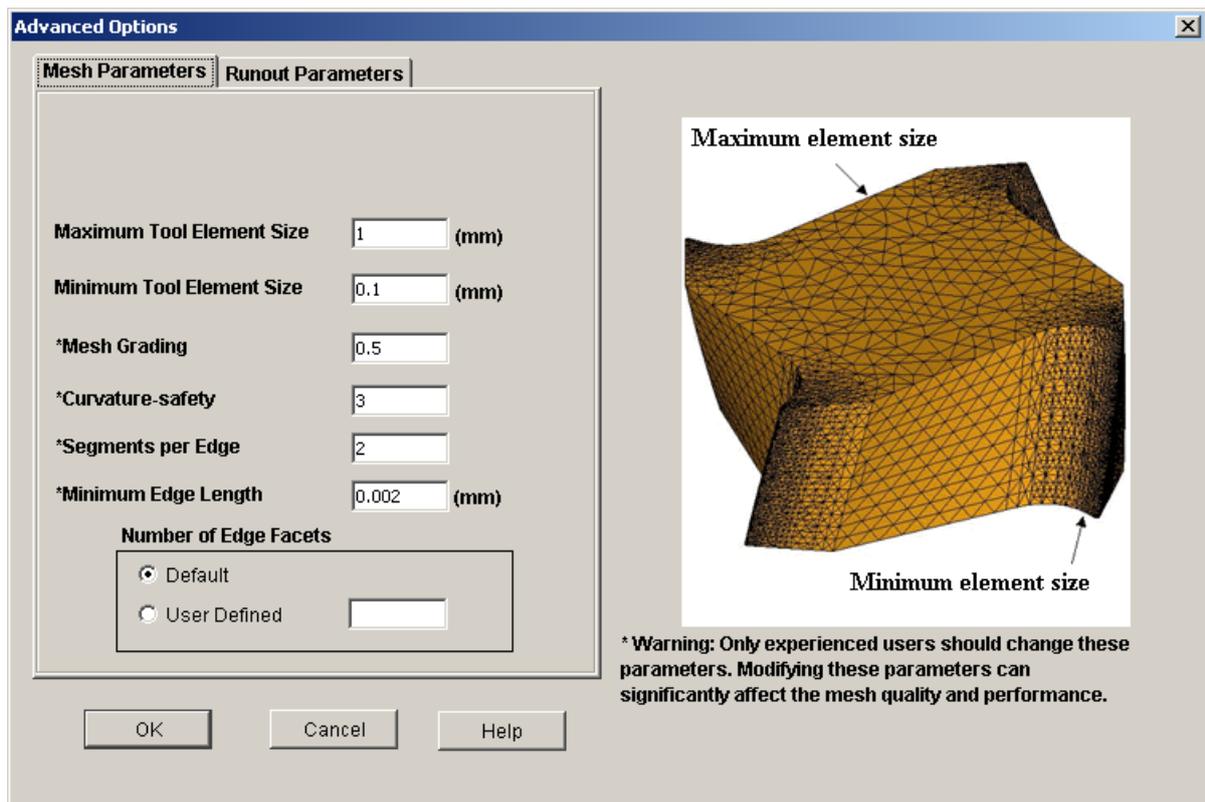


Slika 7.7: Prozor *Advanced Options/Meshing Parameters* za podešavanje mreže obratka

Unutar ovog prozor mogu se promeniti početni parametri umrežavanja:

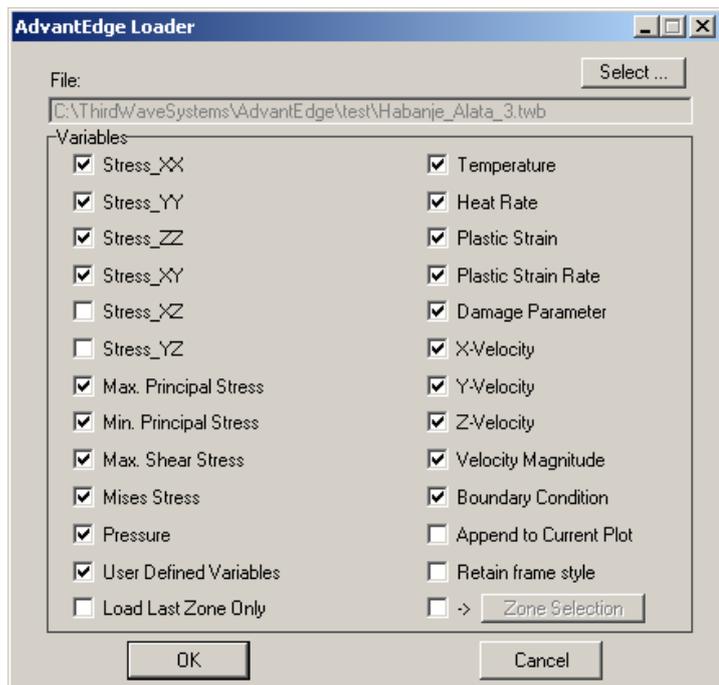
- Maksimalna veličina elementa - najveća dozvoljena veličina elementa u okviru mreže obratka koja se javlja daleko od rezne ivice;
- Minimalna veličina elementa - najmanji dozvoljena veličina elementa u okviru mreže obratka koja se javlja u blizini rezne ivice;
- Gradacija mreže - određuje prirodu promene od finih elemenata u blizini samog vrha rezne ivice, ka grubim elementima dalje od rezne ivice. Ova vrednost se kreće od 0,1 do 1,0. Smanjenje ovog parametra će dovesti do sporijeg prelaza između veličine elemenata i samim tim mnogo prefinjenije mreže.
- Zakrivljenost - definiše preciznost u kojem su zakrivljene geometrijske karakteristike u okviru modela zahvaćene od strane mreže. Ova vrednost se kreće od 0,2 do 5,0, gde 0,2 predstavlja grube mreže;
- Segmenti na ivici - određuje gustinu čvorova po jedinici dužine jedne ivice u modelu. Ova vrednost se kreće od 0,2 do 5,0 gde 0,2 definiše grubu mrežu;
- Minimalna dužina ivice - minimalna dozvoljena dužina ivice za bilo koji element u mreži. Preporučuje se da minimalna dužina ivica ne prelazi 30% od minimalne veličine elementa alata.

U okviru opcije *Custom Tool Editor/Advanced Options/Mesh Parameters* mogu se izvršiti dodatna podešavanja parametara mreže alata (slika 7.8). Promene ovih parametara mogu bitno uticati na rezultate. Gradacija mreže u inicijalnoj mreži alata stvara fine elemente u blizini vrha alata i relativno veće elemente dalje od vrha alata. Zbog prefinjene mreže na samom vrhu alata, biće bolji kontakt i precizniji rezultati bez značajnog povećanja izračunavanja vremena.



Slika 7.8: Prozor *Advanced Options/Mesh Parameters* za podešavanje mreže alata

Potprogram *Tecplot* omogućava korisnicima da definišu izlazne parametre simulacije koji će biti prikazani. U prozoru *AdvantEdge Loader* vrši se izbor fajlova sa željenim rezultatima. Kao što se vidi na slici 7.9 može se vršiti ispitivanje napona, deformacija, temperature, parametara oštećenja, količine toplote, maksimalnog glavnog napona, pritiska, plastičnih deformacija, stope plastičnih deformacija i tako dalje. Osim ponuđenih rezultata, postoji i opcija *User Defined Result* gde mogu da se definišu željeni rezultati.



Slika 7.9: Prozor *AdvantEdge Loader*

## 7.5 Računarska obrada simulacije

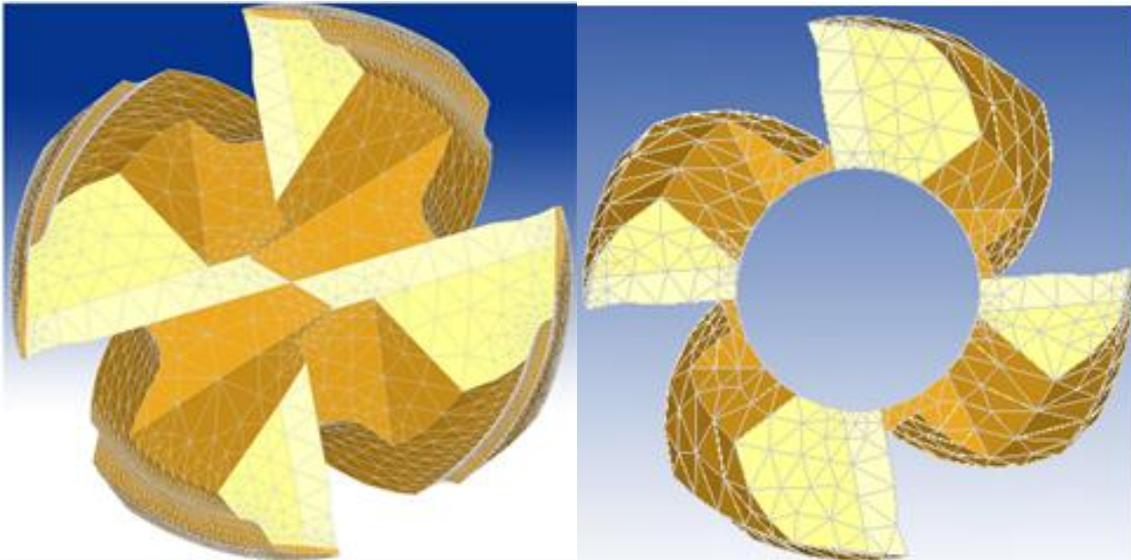
Za pokretanje programa, kako bi obradio simulaciju potrebno je izabrati opciju *Simulation/Submit/Submit Current Job...* koja se nalazi na glavnom meniju.

## 7.6 Prikaz i analiza rezultata simulacije

Prikaz i analiza simulacije opisana je na primeru vretenstog glodanja sa izabranim režimom obrade.

### 7.6.1 Simulacija vretenastog glodanja sa izabranim režimom obrade

Za simulaciju obrade glodanjem u programskom paketu *AdvantEdge*, kao i u prethodnom slučaju, napravljen je model vretenastog glodala u *SolidWorks*-u, kao i jedan pojednostavljen model vretenastog glodala kako bi broj čvorova i elemenata mreže modela bio manji (Mitrović, 2016c). 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*. Na slici 7.10 prikazani su modeli glodala sa i bez pojednostavljenja uvezeni u *AdvantEdge*.



Slika 7.10: Postavka modela glodala različitih složenosti uvezeni u *AdvantEdge*

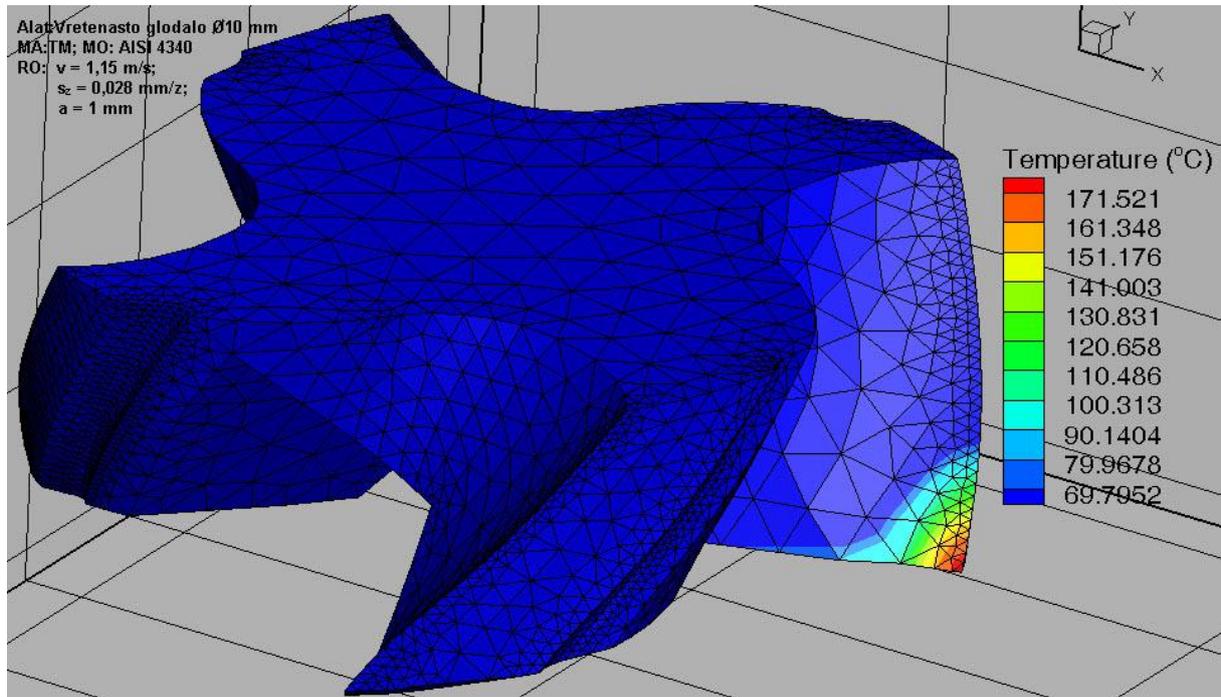
Model obratka nije kreiran u *SolidWorks*-u već je upotrebljena opcija *Create/Edit Standard Workpiece* koju pruža *AdvantEdge* za izbor. Podešeno je da dimenzije modela obratka budu manjih dimenzija u odnosu na obradak iz eksperimenta radi boljeg umrežavanja.

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. Za definisanje graničnih uslova simulacije korišćen je Lagranžov model, dok je ponašanje materijala obratka definisano Džonson-Kuk-ovim modelom.

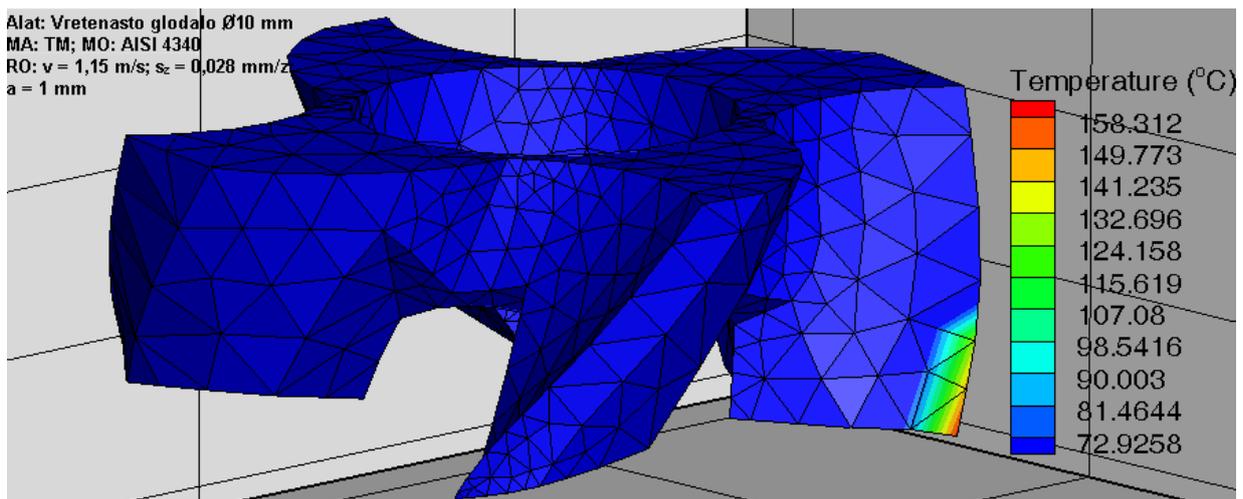
Pokrenute su dve simulacije u demonstracionom modu. Prva simulacija pokrenuta je sa modelom pojednostavljenog glodala, a druga sa modelom glodala koji nije pojednostavljen kako bi se dobili precizniji rezultati simulacije. Ulazni parametri za simulaciju odgovaraju

režimu obrade iz eksperimenta (tabela 5.5, redni broj 12) i ulaznim parametrima simulacije u ANSYS-u. Kao izlazna performansa simulacije izabrana je temperatura rezanja.

Rezultati simulacija obrade glodanjem sa raspodelom temperature prikazani su na slikama 7.11 i 7.12.

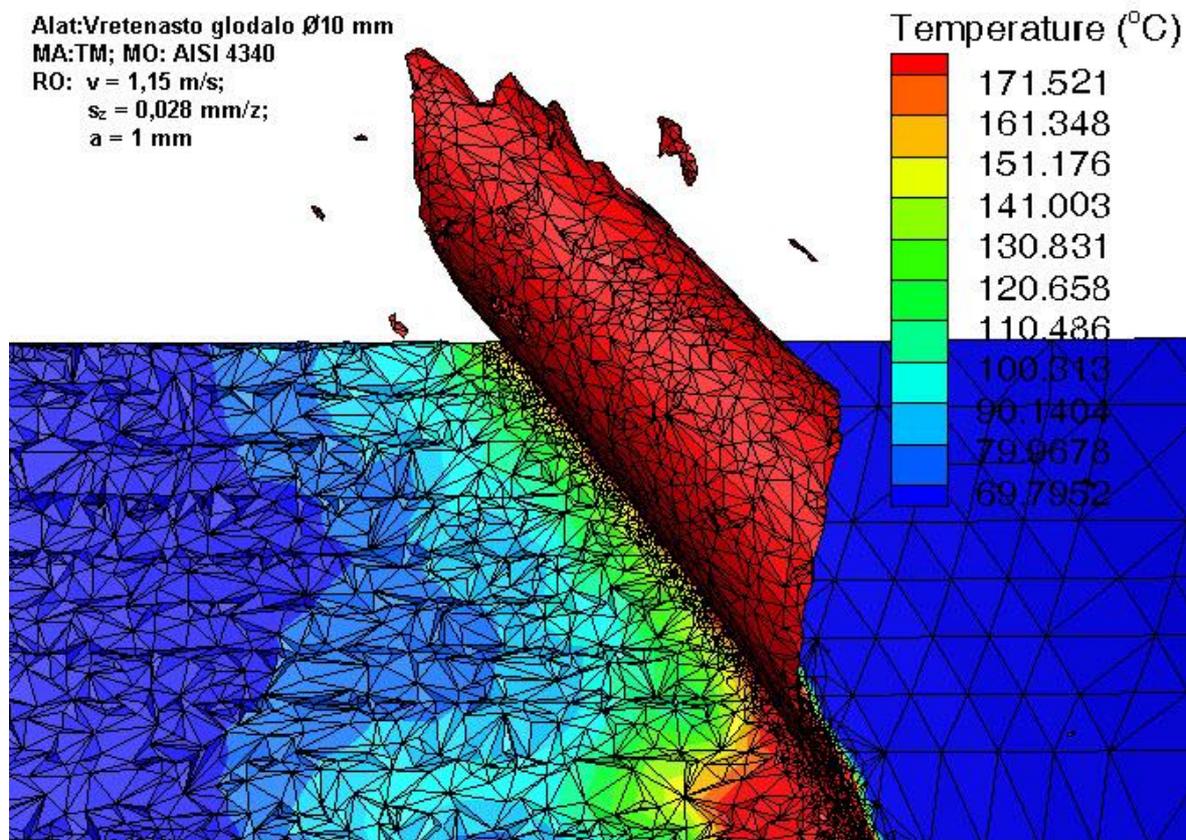


Slika 7.11. Raspodela temperature u simulaciji sa složenijim modelom glodala

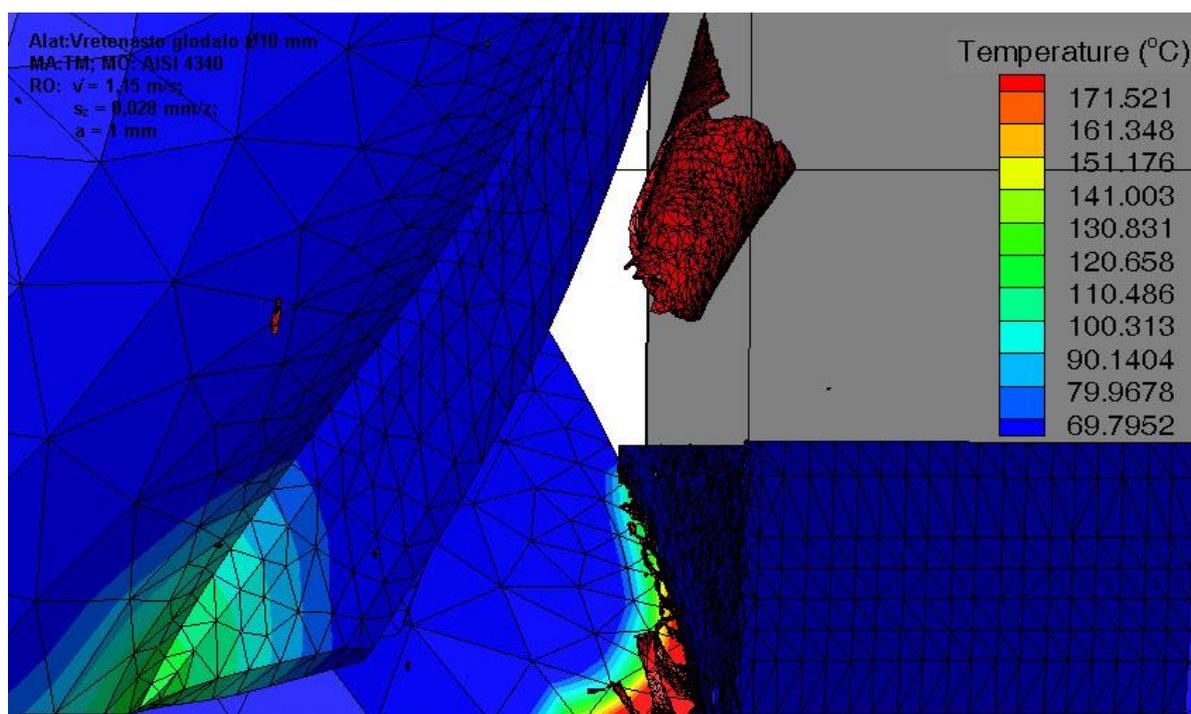


Slika 7.12: Raspodela temperature u simulaciji sa pojednostavljenim glodalom

Uključivanjem potprograma *Tecplot* mogu se videti rezultati simulacije u različitim pogledima. Na slici 7.13 prikazano je formiranje strugotine u momentu kada se zub glodala nalazi u zahvatu (radi bolje vizuelizacije isključen je prikaz alata), dok je na slici 7.14 uključen prikaz alata za slučaj simulacije sa složenijim modelom glodala.



Slika 7.13: Prikaz raspodele temperature tokom formiranja strugotine



Slika 7.14: Prikaz raspodele temperature tokom zahvata glodala sa obratkom

Računarsko vreme potrebno za obradu prve simulacije iznosilo je 1 dan, a za drugu simulaciju 3 dana na istoj radnoj stanici na kojoj su rađene i simulacije u ANSYS-u.

Vrednosti temperature dobijene na osnovu eksperimenta i simulacija sa i bez pojednostavljenja glodala su upoređene i prikazane u tabeli 7.3.

Tabela 7.3: Uporedni rezultati eksperimenta i simulacije u AdvantEdge-u

	Eksperiment	Rezultat simulacije	Greška
Prva simulacija	132,0 °C	158,3°C	19,92%
Druga simulacija	132,0 °C	171,5°C	29,92%

Dobijeni rezultati pokazuju da simulacija sa modelom pojednostavljenog glodala daje približnije vrednosti temperature rezanja koja je izmerena u eksperimentu.

Na osnovu toga, kreirane su simulacije sa modelom pojednostavljenog glodala prema planu eksperimenta prikazanog u tabeli 5.5. U tabeli 7.4 dat je prikaz vrednosti temperatura koje su dobijene u simulacijama za različite režime obrade.

Tabla 7.4: Vrednosti temperature u simulacijama u paketu AdvantEdge, za režime obrade prema planu eksperimenta za glodalo od tvrdog metala

R.br.	v (m/s)	s <sub>z</sub> (mm/z)	a (mm)	Θ (°C)	R.br.	v (m/s)	s <sub>z</sub> (mm/z)	a (mm)	Θ (°C)
1	1,10	0,025	0,71	102,3	13	1,05	0,028	1,00	132,6
2	1,23	0,025	0,71	135,6	14	1,31	0,028	1,00	155,9
3	1,10	0,031	0,71	97,0	15	1,15	0,021	1,00	145,1
4	1,23	0,031	0,71	117,2	16	1,15	0,035	1,00	123,9
5	1,10	0,025	1,41	149,9	17	1,15	0,028	0,50	100,1
6	1,23	0,025	1,41	124,2	18	1,15	0,028	2,00	165,2
7	1,10	0,031	1,41	103,0	19	1,05	0,028	1,00	132,6
8	1,23	0,031	1,41	119,9	20	1,31	0,028	1,00	155,9
9	1,15	0,028	1,00	158,3	21	1,15	0,021	1,00	145,1
10	1,15	0,028	1,00	158,3	22	1,15	0,035	1,00	123,9
11	1,15	0,028	1,00	158,3	23	1,15	0,028	0,50	100,1
12	1,15	0,028	1,00	158,3	24	1,15	0,028	2,00	165,2

## 8 ANALIZA REZULTATA

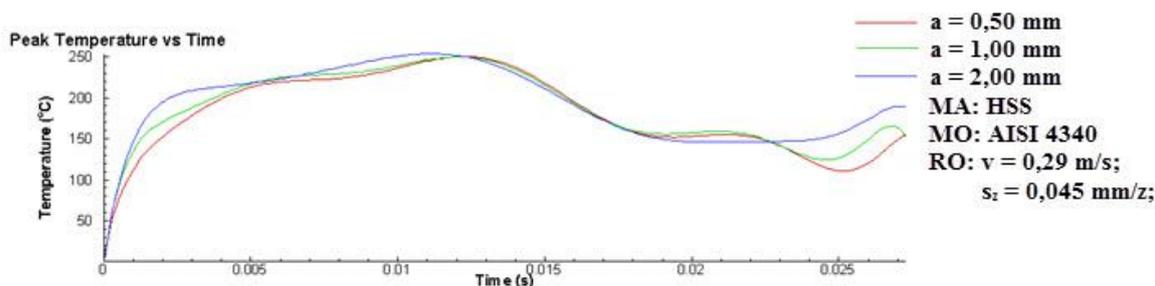
### 8.1 Analiza uticaja elemenata režima obrade na temperaturu rezanja u *AdvantEdge*-u za glodalo od brzoreznog čelika

Za izabrane režime obrade iz plana eksperimenta, za obradu sa vretenastim glodalom od brzoreznog čelika (iz tabele 5.7), prikazani su rezultati simulacija na osnovu kojih je analiziran uticaj dubine rezaja, korak po zubu i brzine rezanja na temperaturu u zoni rezanja.

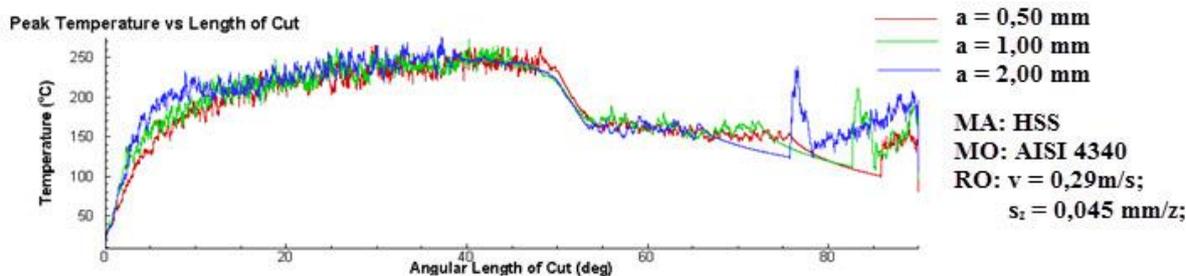
#### 8.1.1 Uticaj dubine rezanja na temperaturu rezanja

U potprogramu Tecplot mogu se uključiti uporedni prikazi rezultata simulacija izborom opcije Multi-Procect Display.

Na slici 8.1 prikazani su uporedni dijagrami temperature u zoni rezanja (koja obuhvata alat, obradak i strugotinu) u odnosu na vreme obrade za režime obrade 12, 23 i 24 iz tabele 5.7 ( $v = 0,29$  m/s;  $s_z = 0,045$  mm/z;  $a = 1,0$  mm za režim 12; za režim 23  $a = 0,50$  mm; za režim 24 je  $a = 2$  mm). Na slici 8.2 dat je prikaz dijagrama temperature u zoni rezanja u odnosu na ugaonu dužinu obrade od  $90^\circ$  za iste režime obrade. Analiza je vršena posmatrajući jedan zub glodala u zahvatu, počev od njegovog kontakta sa obratkom do izlaska iz zahvata, što odgovara obrtaju glodala od  $90^\circ$ . Na dijagramima su rezultati simulacija prikazani različitim bojama, a sa desne strane data je legenda.



Slika 8.1: Prikaz dijagrama temperatura-vreme simulacije za različite dubine rezanja



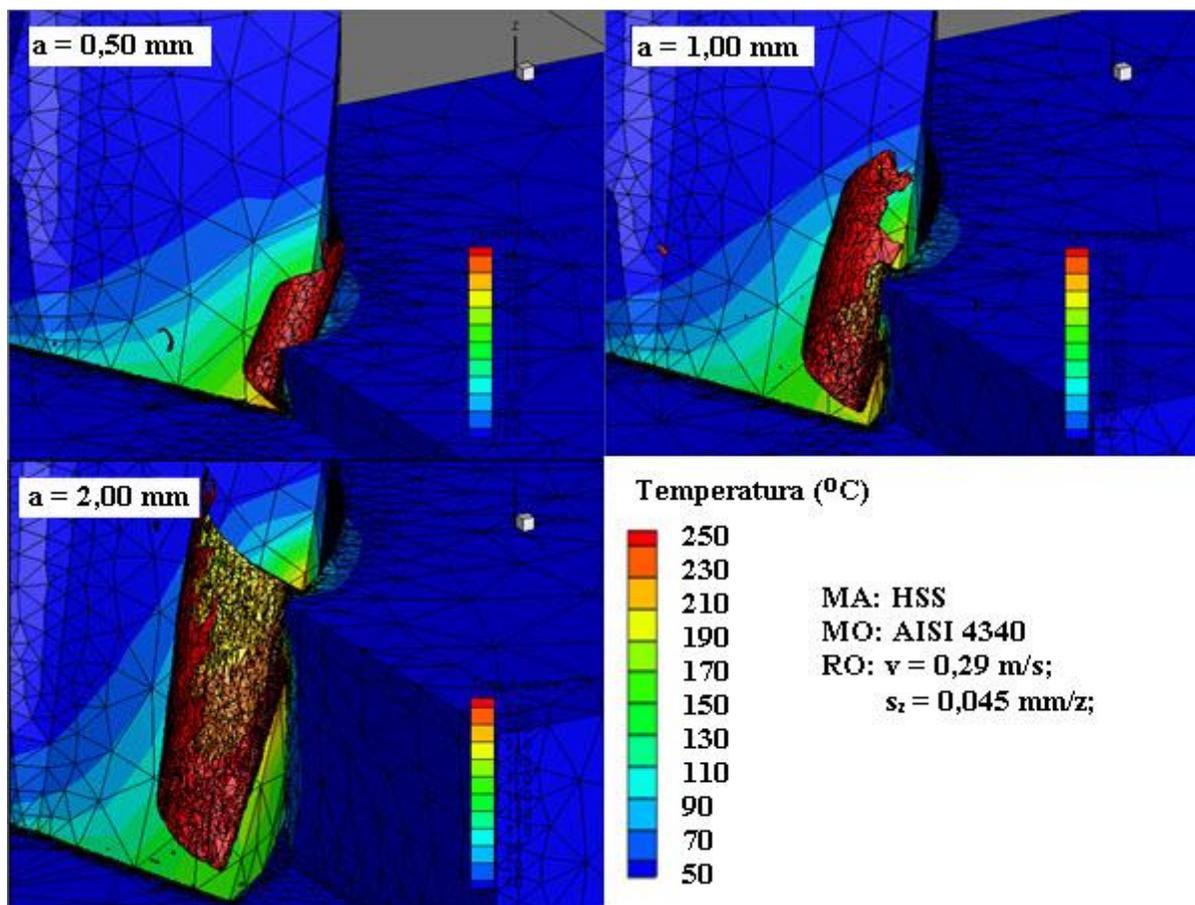
Slika 8.2: Prikaz dijagrama temperatura-ugaona dužina za različite dubine rezanja

Sa dijagrama se može uočiti nagli rast temperature po ulasku zuba glodala u zahvat, pri čemu se najviša vrednost temperature pojavljuje nakon ugaone dužine obrade od  $45^\circ$ , a potom opada na približno konstantnu vrednost do izlaska zuba iz zahvata. Takođe se može uočiti da temperatura u zoni rezanja raste sa porastom dubine rezanja, pri čemu je temperatura najviša u slučaju najveće dubine rezanja. Ponovni skok temperature se javlja prilikom ulaska novog zuba u zahvat.

Na dijagramu (slika 8.2) se uočava različit skokovit porast temperature po izlasku posmatranog zuba iz zahvata, što se može objasniti time da pri različitim dubinama rezanja ne ulazi u isto vreme sledeći zub glodala u zahvat.

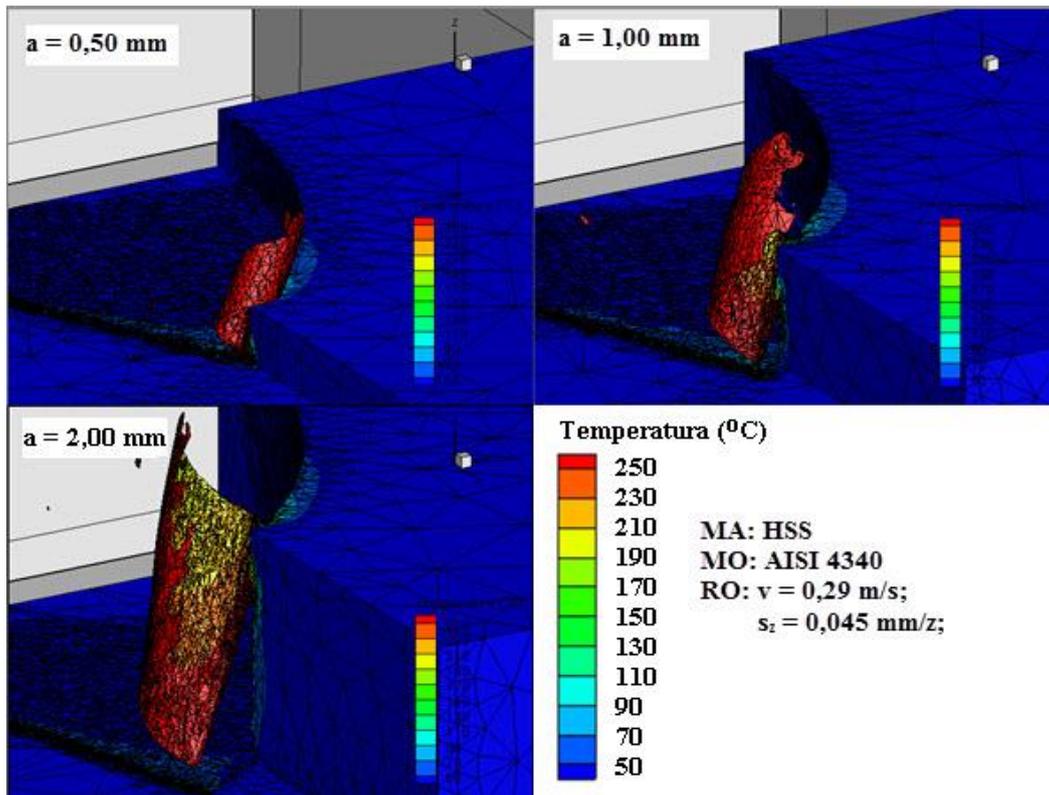
Prikazi uporednih simulacija koje su snimljene u istim vremenskim trenucima (selektovanjem iste zone koja se prikazuje) za režime obrade 12, 23 i 24 dati su na slici 8.3.

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. Može se uočiti različita debljina strugotine koja se formira kao i razlika u veličini temperaturnih zona za tri režima obrade koji se razlikuju samo u dubini rezanja.



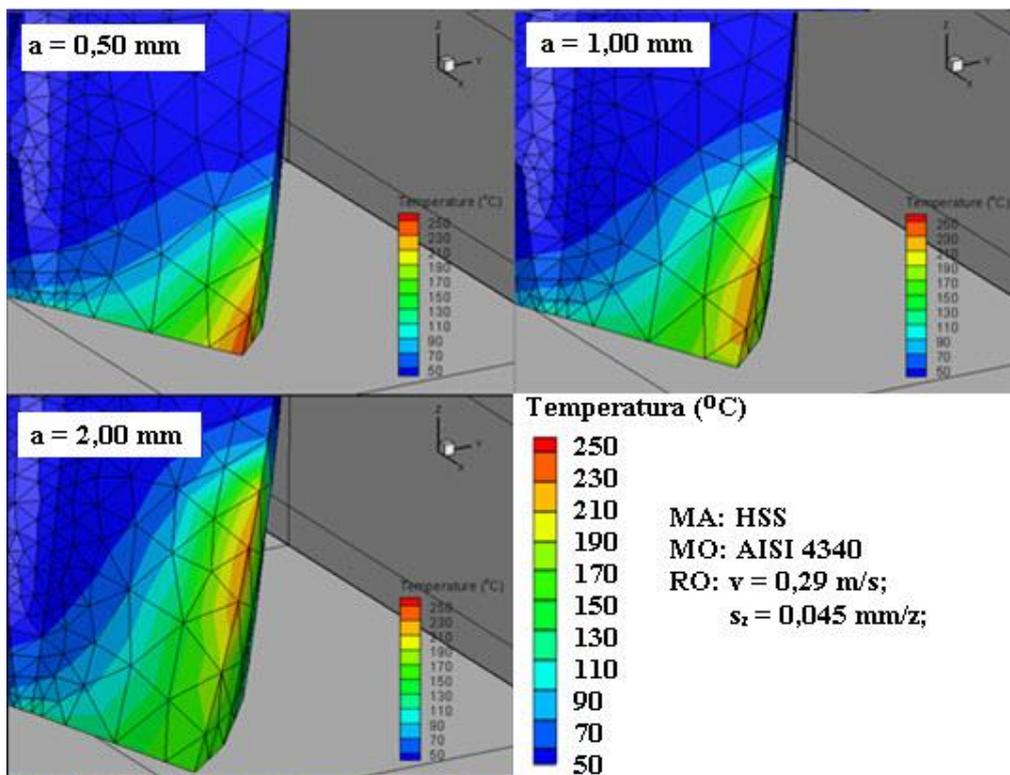
Slika 8.3: Prikaz uporednih simulacija sa različitim dubinama rezanja

Radi bolje vizuelizacije na slici 8.4 isključen je prikaz alata tako da se može bolje uočiti umrežen deo obratka koji je u kontaktu sa alatom.



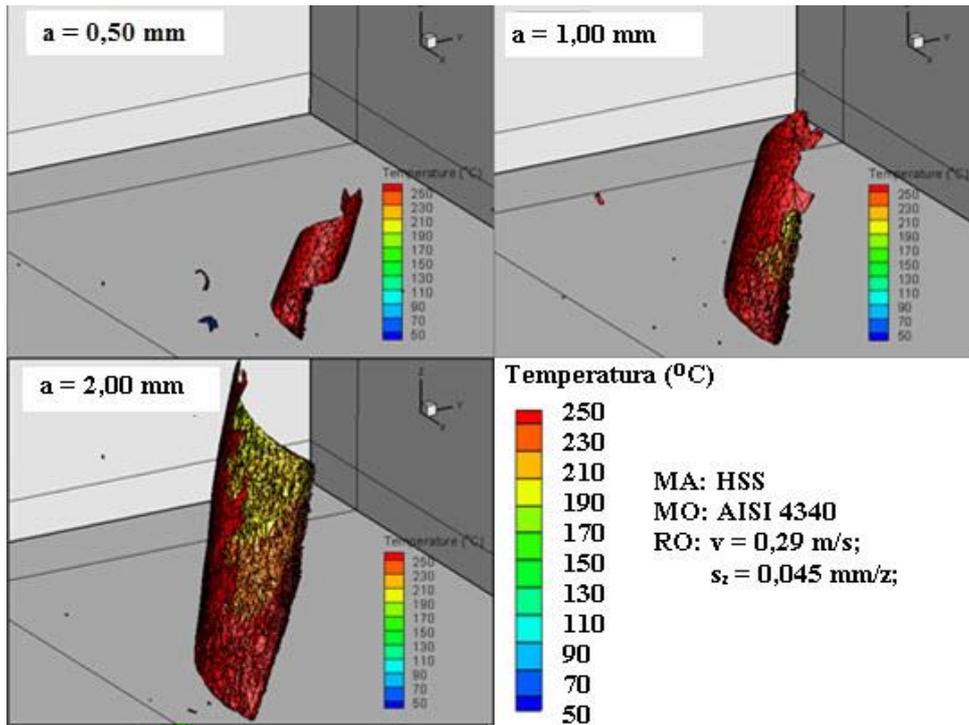
Slika 8.4: Prikaz uporednih simulacija bez prikaza alata

Na slici 8.5 prikazan je alat iz uporednih simulacija gde se može uočiti da položaj zone sa najvišom temperaturom zavisi od dubine rezanja. Kod manje dubine rezanje najviša temperaturna zona je na samom vrhu zuba glodala. Sa porastom dubine rezanja temperaturno polje sa najvišom zonom se pomera počev od vrha duž rezne ivice glodala.



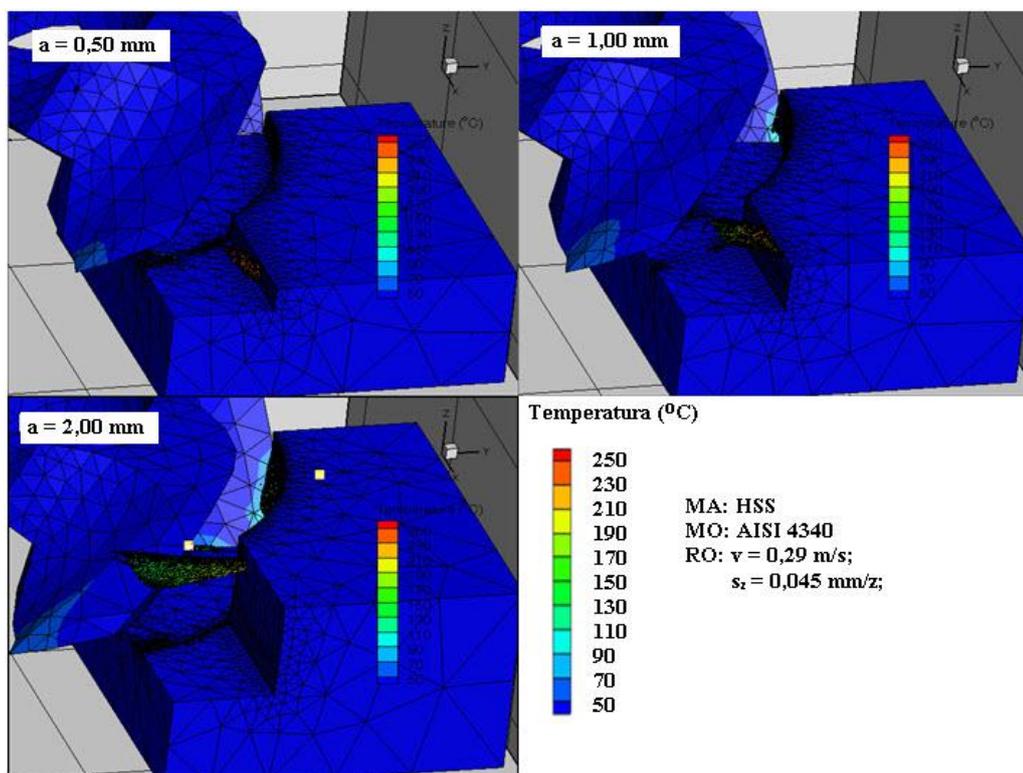
Slika 8.5: Izdvojeni prikaz alata na uporednim simulacijama

Slika 8.6 daje prikaz strugotine na uporednim simulacijama pri čemu se može uočiti da se spoljašnja strana strugotine za najveću dubinu rezanja pri izlasku iz zahvata počinje brže hladiti od strugotine koja je nastala pri manjoj dubini rezanja.



Slika 8.7: Izdvojeni prikaz strugotine na uporednim simulacijama

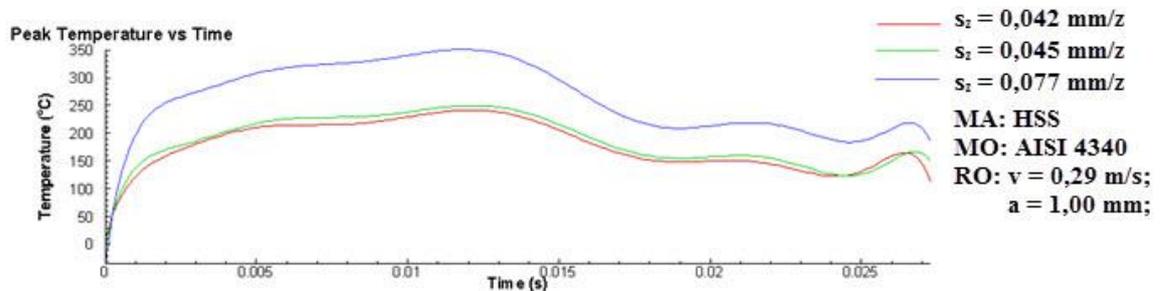
Na slici 8.7 može se uočiti da sa porastom dubine rezanja sledeći zub glodala ranije ulazi u zahvat.



Slika 8.7: Prikaz ulaska sledećeg zuba u zahvat pri različitim dubinama rezanja

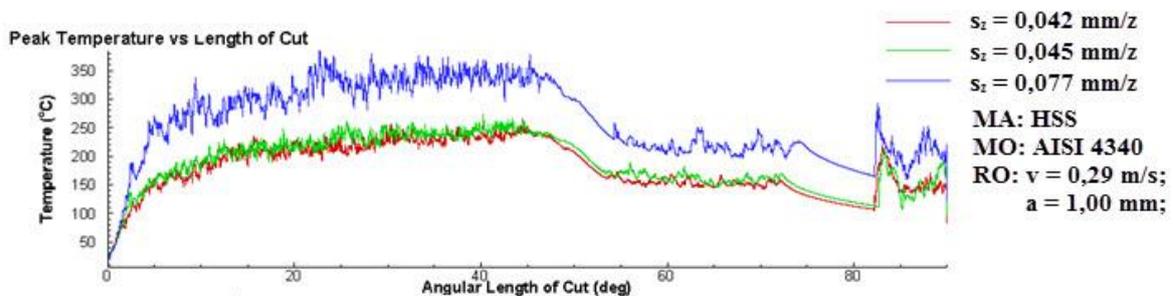
### 8.1.2 Uticaj koraka po zubu na temperaturu rezanja

Na slici 8.8 prikazani su uporedni dijagrami temperature u zoni rezanja (najviše vrednosti) u odnosu na vreme obrade za režime 12,15 i 16 iz tabele 5.7 ( $v = 0,29$  m/s;  $a = 1,0$  mm; za režim 12 je  $s_z = 0,045$  mm/z; za režim 15 je  $s_z = 0,042$  mm/z; za režim 16 je  $s_z = 0,077$  mm/z). 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 8.8: Prikaz dijagrama temperatura-vreme simulacije za različiti korak rezanja

Na slici 8.9 prikazan je dijagram zavisnosti temperature od ugaone dužine obrade. Za dužinu ugaone obrade od  $90^\circ$  može se videti da temperatura naglo opada na polovini dužine obrade.

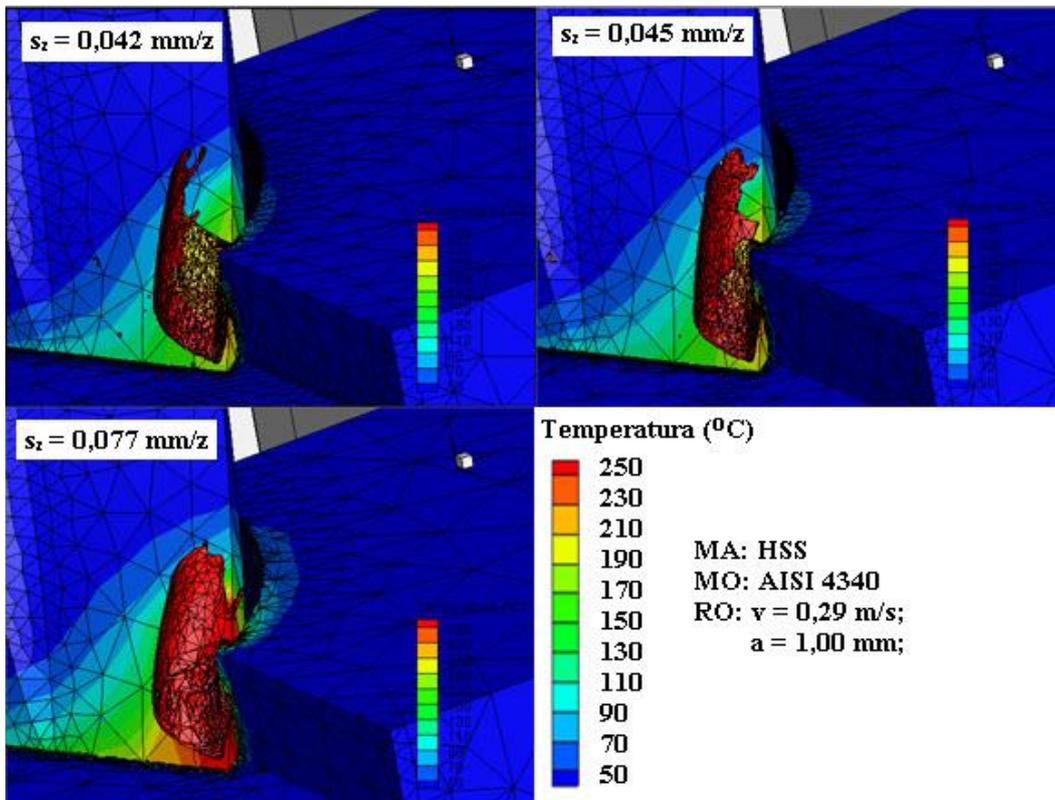


Slika 8.9: Prikaz dijagrama temperatura-ugaona dužina obrade za različiti korak rezanja

Prikazi uporednih simulacija koje su snimljene u istim vremenskim trenucima (selektovanjem iste zone koja se prikazuje) za režime obrade 12,15 i 16 dati su na slici 8.10.

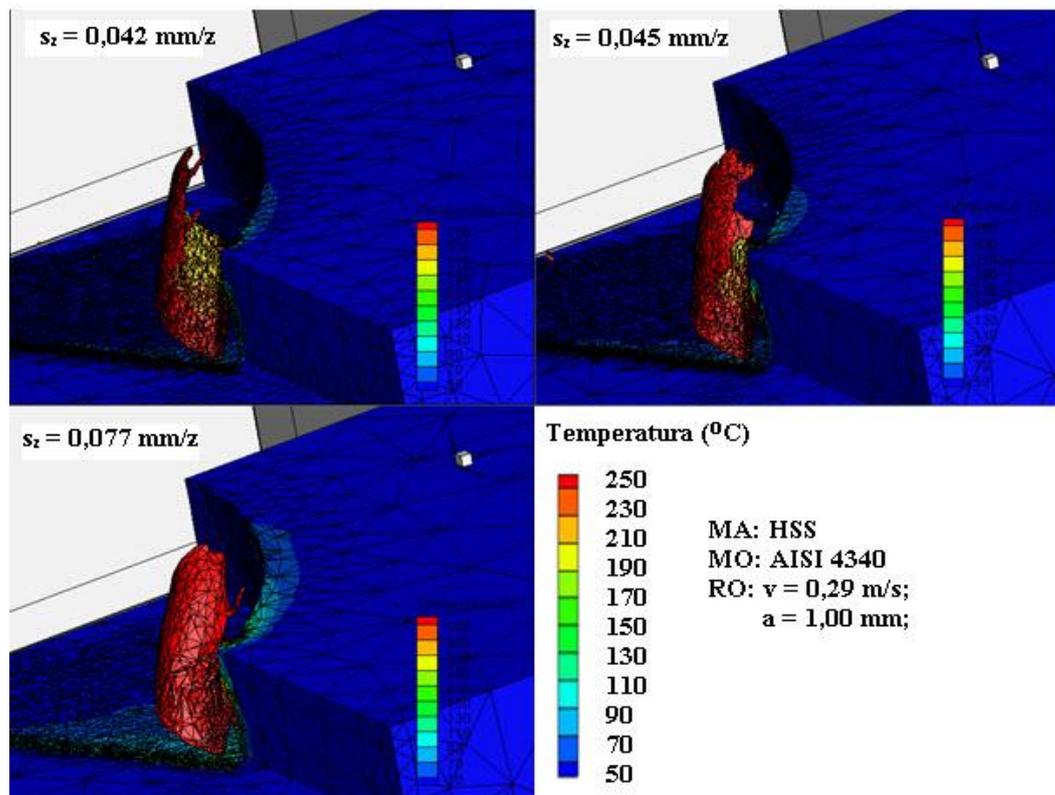
Izabran je minimalni nivo temperature od  $50^\circ\text{C}$  i maksimalni nivo od  $250^\circ\text{C}$  u 11 nivoa uvećanja.

Na slici 8.10 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.



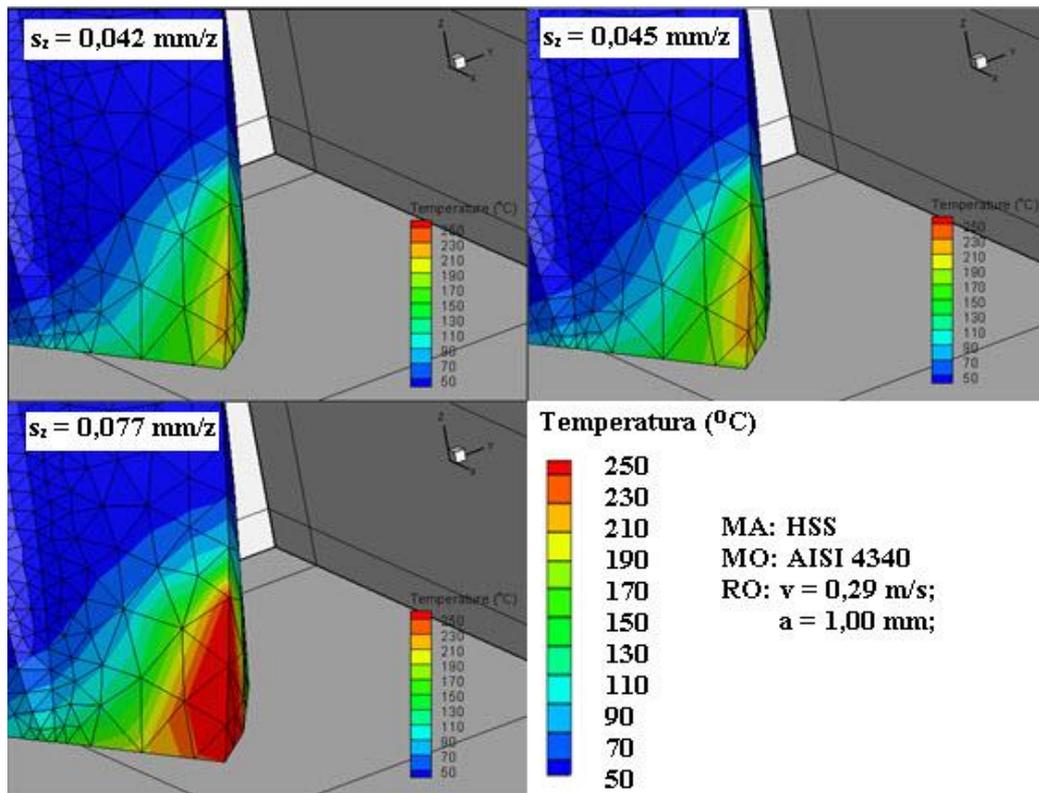
Slika 8.10: Prikaz uporednih simulacija sa različitim korakom po zubu

Na slici 8.11 isključen je prikaz alata da bi se bolje video umrežen deo obratka koji je u kontaktu sa alatom.



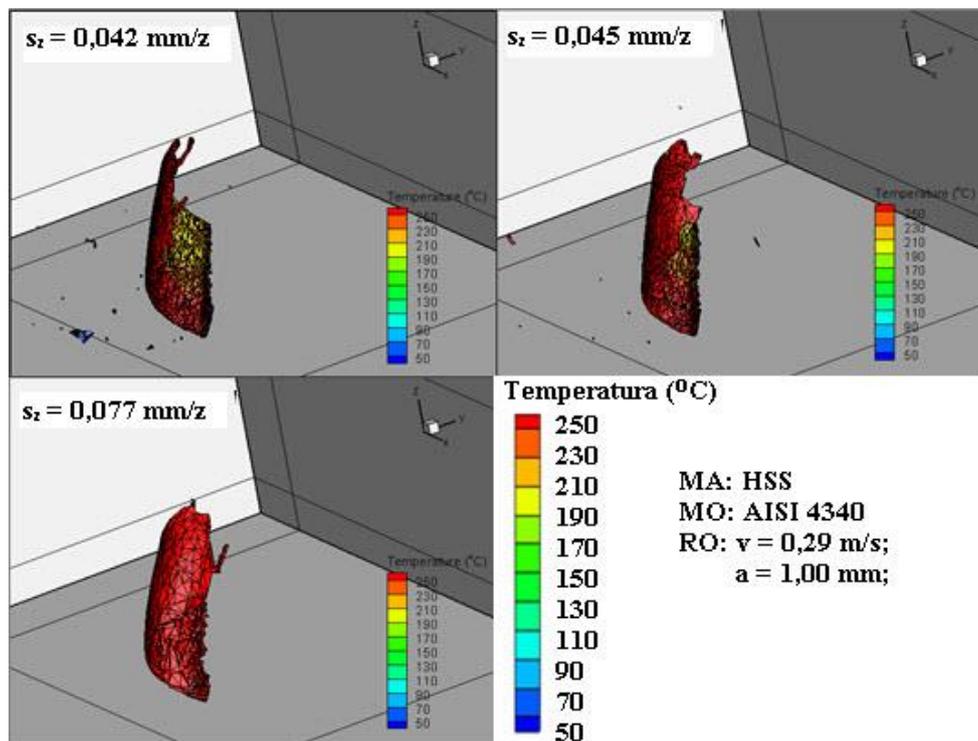
Slika 8.11: Prikaz uporednih simulacija bez prikaza alata

Na slici 8.12 prikazan je alat iz uporednih simulacija gde se može bolje videti da sa povećanjem koraka raste temperatura u zoni rezanja.



Slika 8.12: Izdvojeni prikaz alata na uporednim simulacijama

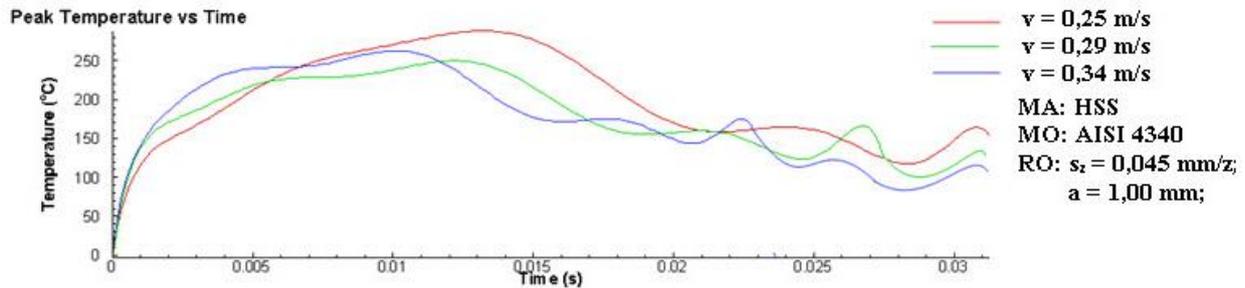
Slika 8.13 daje prikaz strugotine na uporednim simulacijama za različite korake po zubu.



Slika 8.13: Izdvojeni prikaz strugotine na uporednim simulacijama

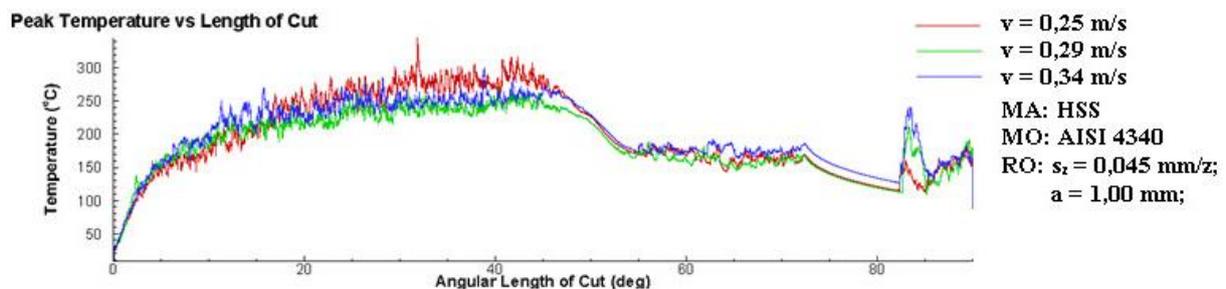
### 8.1.3 Uticaj brzine rezanja na temperaturu rezanja

Na slici 8.14 prikazani su uporedni dijagrami temperature u zoni rezanja (najviše vrednosti) u odnosu na vreme obrade za režime 9, 13 i 20 iz tabele 5.7 ( $s_z = 0,045$  mm/z;  $a = 1,0$  mm; za režim 9 je  $v = 0,29$  m/s; za režim 13 je  $v = 0,25$  m/s; za režim 20 je  $v = 0,34$  m/s). Sa dijagrama se može uočiti da se na početku obrade najviša temperatura postiže sa najvećom brzinom rezanja, a da pri manjoj brzini rezanja treba da protekne više vremena da se postigne maksimalna vrednost temperature.



Slika 8.14: Prikaz dijagrama temperatura-vreme simulacije za različite brzine rezanja

Na slici 8.15 prikazan je dijagram zavisnosti temperature od ugaone dužine obrade. Kao i na prethodnim dijagramima za ugaonu dužinu obrade od  $90^\circ$  može se videti da temperatura naglo opada na polovini dužine obrade.

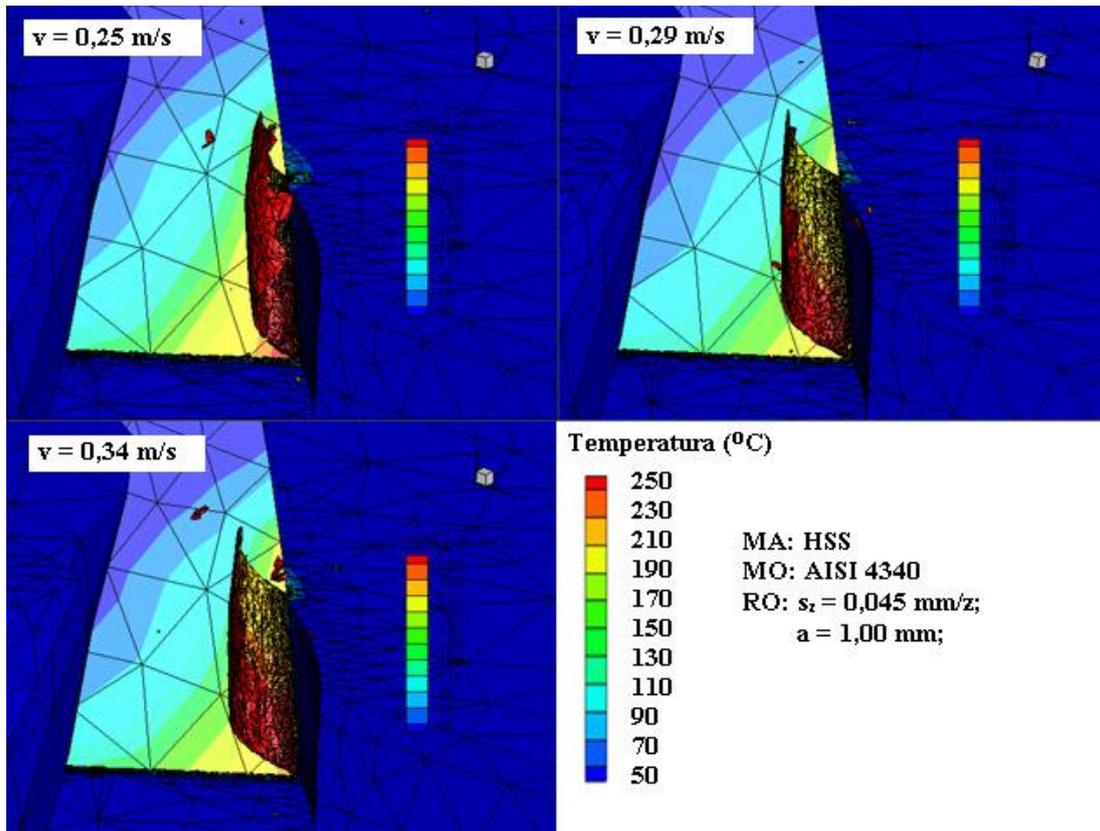


Slika 8.15: Prikaz dijagrama temperatura-ugaona dužina obrade za različite brzine rezanja

Prikazi uporednih simulacija koje su snimljene u istim vremenskim trenucima (selektovanjem iste zone koja se prikazuje) za režime obrade 9,13 i 20 dati su na slici 8.16.

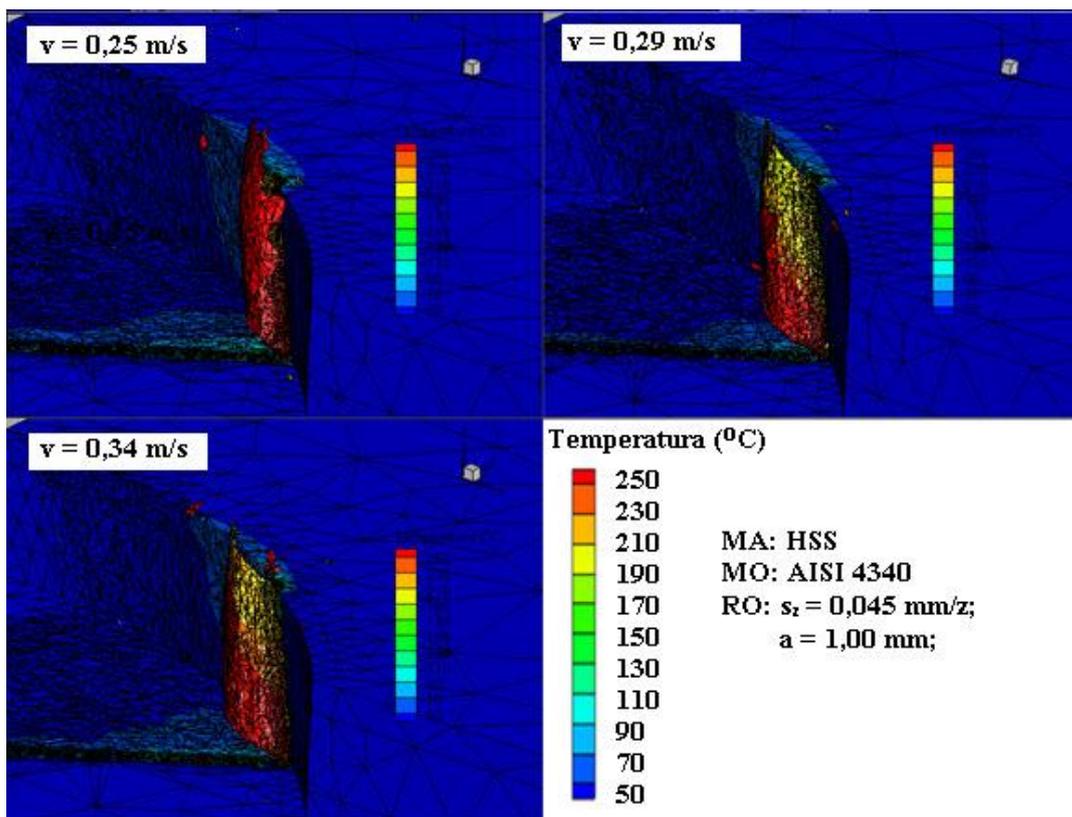
Izabran je minimalni nivo temperature od  $50^\circ\text{C}$  i maksimalni nivo od  $250^\circ\text{C}$  u 11 nivoa uvećanja.

Na slici 8.16 izabrana je zona malo pre izlaza zuba iz zahvata sa obratkom i zbog strugotine koja se još nije izdvojila ne vide se dobro temperaturske zone u blizini rezne ivice.



Slika 8.16: Prikaz uporednih simulacija sa različitim brzinama rezanja

Na slici 8.17 isključen je prikaz alata da bi se bolje video umrežen deo obratka koji je u kontaktu sa alatom.



Slika 8.17: Prikaz uporednih simulacija bez prikaza alata



## 8.2 Analiza rezultata dobijenih eksperimentom, trofaktornim modelom i simulacijama u AdvantEdge-u

Tokom istraživanja su razvijeni različiti modeli za izračunavanje vrednosti temperature u zoni rezanja pri obradi glodanjem. Rezultati su dobijeni putem eksperimenta, trofaktornog modela i simulacijama u AdvantEdge-u. Vrednosti rezultata date su u tabeli 8.1.

Tabela 8.1: Rezultati dobijeni preko eksperimenta, faktornog modela (sa i bez međusobnog uticaja) i simulacija u AdvantEdge-u sa procentualnom greškom E za  $\Theta$  (glodalo od TM)

Redni broj	Eksperiment	Trofaktorni model				Simulacija	
	$\Theta_{Exp., \text{ } ^\circ\text{C}}$	Model bez međusobnog uticaja $\Theta_{F.M.1, \text{ } ^\circ\text{C}}$	E,%	Model sa međusobnim uticajem $\Theta_{F.M.2, \text{ } ^\circ\text{C}}$	E,%	$\Theta_{Adv.Edge, \text{ } ^\circ\text{C}}$	E,%
1	81,0	98,15	21,17	100,35	23,89	102,3	26,30
2	104,4	106,94	2,43	117,18	12,24	135,6	29,89
3	84,9	87,47	3,03	94,62	11,45	97,0	14,25
4	96,8	95,31	1,54	117,83	21,73	117,2	21,07
5	174,5	160,07	8,27	150,39	13,82	149,9	14,10
6	152,3	174,40	14,51	143,36	5,87	124,2	18,45
7	127,1	142,65	12,23	118,79	6,54	103,0	18,96
8	142,6	155,43	9,00	120,75	15,32	119,9	15,92
9	127,5	122,01	4,31	131,07	2,80	158,3	24,16
10	128,6	122,01	5,12	131,07	1,92	158,3	23,09
11	130,2	122,01	6,29	131,07	0,67	158,3	21,58
12	132,0	122,01	7,57	131,07	0,70	158,3	19,92
13	119,5	113,78	4,79	121,62	1,77	132,6	10,96
14	139,8	134,85	3,54	144,49	3,35	155,9	11,52
15	137,4	142,34	3,60	113,03	17,74	145,1	5,60
16	108,9	108,27	0,58	94,14	13,55	123,9	13,77
17	80,8	74,44	7,78	80,69	0,14	100,1	23,89
18	167,5	199,98	19,39	128,67	23,18	165,2	1,37
19	137,5	113,78	17,25	121,62	11,55	132,6	3,56
20	147,6	134,85	8,64	144,49	2,11	155,9	5,62
21	134,5	142,34	5,83	113,03	15,96	145,1	7,88
22	118,3	108,27	8,48	94,14	20,42	123,9	4,73
23	88,9	74,44	16,27	80,69	9,24	100,1	12,60
24	173,5	199,98	15,26	128,67	25,84	165,2	4,78
	Prosečna greška $\Rightarrow$		8,62		10,91		14,75

Analiza je izvršena u vidu dijagrama (slika 8.20) gde su na apcisi u koordinantnom sistemu prikazani odgovarajući redni brojevi režima obrade iz tabele 8.1, dok su na ordinati vrednosti temperature u zoni rezanja. Pored ovog dijagrama dat je i dijagram u vidu histograma (slika 8.21) koji pokazuje kolika je srednja procentualna greška za odgovarajući model.

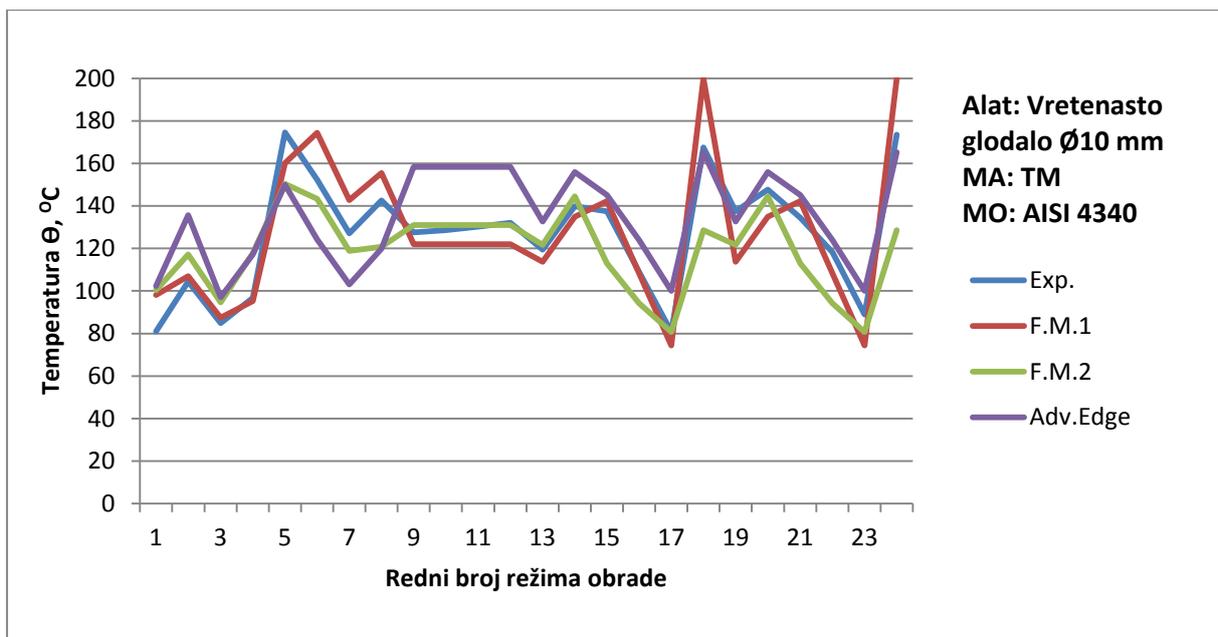
Radi preglednijeg izgleda dijagrama uvedene su sledeće skraćenice za modele:

F.M.1 - model dobijen na osnovu trofaktornog plana, bez međusobnog uticaja faktora

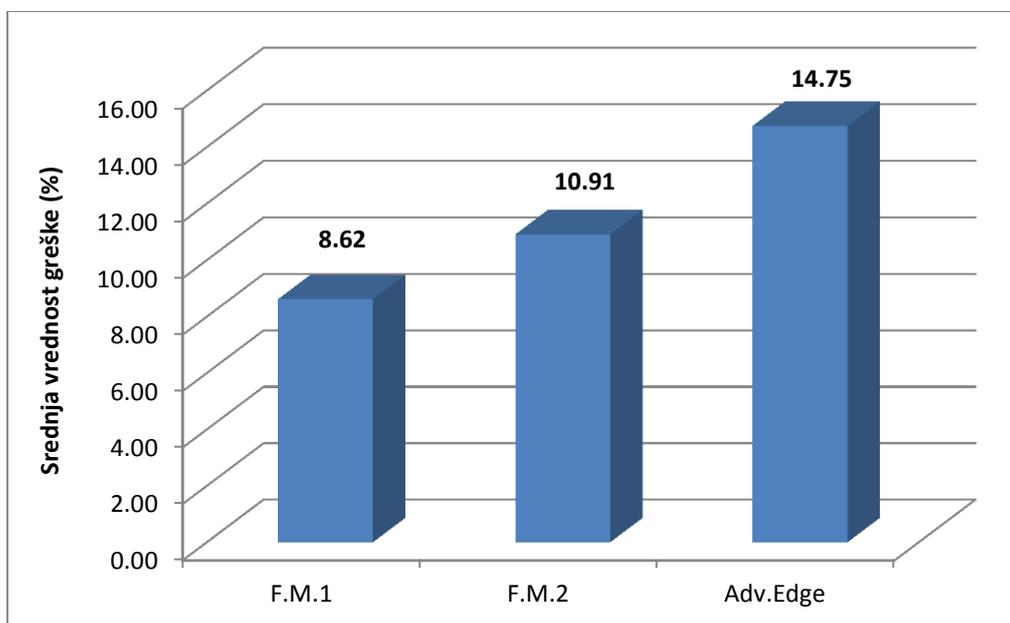
F.M.2 - model dobijen na osnovu trofaktornog plana, sa međusobnim uticajem faktora

Adv.Edge - model dobijen simulacijama u *AdvantEdge*

Ekperimentalne vrednosti su prikazane skraćenicom Exp.



Slika 8.20: Grafički prikaz dobijenih vrednosti za temperaturu u zoni rezanja



Slika 8.21: Histogram srednje procentualne greške za svaki od modela

Sa histograma se vidi da najmanju grešku odstupanja daje model dobijen na osnovu trofaktornog plana sa međusobnim uticajem faktora, dok nešto lošiju vrednost daje isto trofaktorni model bez međusobnog uticaja faktora. Simulacije dobijene u *AdvantEdge*-u su dale grešku oko 15% što se može smatrati kao dobar rezultat.

### 8.2.1 Poređenje različitih načina merenja temperature rezanja termovizijskom kamerom i simulacijama u *AdvantEdge*-u

Osim analize dobijenih rezultata temperature u zoni rezanja, treba napomenuti razlike u samom načinu merenja temperature.

Termovizijskom kamerom vršeno je više probnih testova sa različitim dužinama obrade. Uočeno je da je za dužine obrade manje od 50 mm kvalitet snimaka termovizijskom kamerom loš. Iz tog razloga, pri eksperimentalnim merenjima izabrana je dužina obrade od 50 mm.

U programskom paketu *AdvantEdge* merena je temperatura rezanja posle ugaone dužine obrade od  $90^{\circ}$  pri izlasku zuba iz zahvata. Izabrana je ugaona dužina obrade od  $90^{\circ}$  jer je računarsko vreme potrebno za obradu simulacije jedan dan. U slučaju ugaone dužine obrade od  $360^{\circ}$  taj period iznosi 4 dana.

Određivanje temperature u programskom paketu *AdvantEdge* za dužinu obrade od 50 mm, sa postojećim računarskim resursima, koji podrazumevaju radnu stanicu HP xw8600 sa 2 x CPU procesora sa 4 fizička jezgra svaki (što znači ukupno 8 fizičkih jezgara i 16 GB RAM-a) zahtevalo bi dug vremenski period.

Na primer: za izabrani režim obrade ( $v = 1,15$  m/s, odnosno  $n = 2200$  o/min,  $s_z = 0,028$  mm/z,  $a = 2$  mm), glavno vreme obrade iznosi:

$$t_g = \frac{L}{n \cdot s} = \frac{50 \text{ mm}}{2200 \text{ o/min} \cdot 0,028 \cdot 4 \text{ mm/o}} = 0,2 \text{ min} \quad (8.1)$$

Što znači da za vreme od 0,2 min glodalo napravi:  $2200 \text{ o/min} \cdot 0,2 \text{ min} = 440$  obrtaja.

U tom slučaju ukupno računsko vreme na radnoj stanici iznosilo bi:  $440 \cdot 4 \text{ dana} = 1760$  dana. Da bi se takva simulacija uradila potrebno je imati super računar. Poređenja radi, kineski naučnici su 2016 konstruisali super računar sa 10.65 miliona fizičkih jezgara (Supercompute World, 2016).

## 9 ZAKLJUČAK

Cilj istraživanja bio je simulacija toplotnih pojava pri obradi glodanjem primenom metode konačnih elemenata. Urađena su eksperimentalna merenja temperature u zoni rezanja pri obradi glodanjem sa vretenastim glodalima od tvrdog metala i od brzoreznog čelika. Snimanje temperature tokom eksperimenta sprovedeno je posredstvom termovizijske kamere. Eksperiment je sproveden prema trofaktornom planu drugog reda. Zasebno su razrađeni modeli bez međusobnog uticaja i modeli sa međusobnim uticajem za temperaturu u zoni rezanja pri obradi glodanjem.

Za kreiranje simulacija toplotnih pojava odabrani su programski paketi *ANSYS* i *AdvantEdge*. Na osnovu kreiranih simulacija, uočeni su problemi i ograničenja u *ANSYS*-u, koji otežavaju i skoro onemogućavaju pouzdanu analizu temperature u zoni rezanja za simulacije obrade glodanjem. Za razliku od *ANSYS*-a, programski paket *AdvantEdge*, omogućava pouzdanu analizu temperature u zoni rezanja i stoga je korišćen u daljem istraživanju.

Prema trofaktornom planu eksperimenta kreirane su simulacije u programskom paketu *AdvantEdge* za glodalo od tvrdog metala, a zatim je izvršena analiza rezultata dobijenih eksperimentom, trofaktornim planom i simulacijama. Urađene su i simulacije sa glodalom od brzoreznog čelika, na osnovu kojih je analiziran uticaj elementa režima obrade na temperaturu rezanja.

Na osnovu sprovedenih teoretskih i eksperimentalnih istraživanja, kao i izvršenih analiza, mogu se izvesti sledeći zaključci:

Prilikom kreiranja simulacija obrade glodanjem u *ANSYS*-u uočeni su problemi i ograničenja, pri čemu je glavni problem proces umrežavanja obratka, kao i modeliranje geometrije glodala. Previše gusta mreža bitno utiče na povećanje vremena obrade simulacije i može trajati danima, pa čak i da se usled sistemskih grešaka uopšte i ne završi. Za dobre rezultate simulacije, potrebno je imati jače računarske resurse od PC računara. Korišćenjem radne stanice znatno se može skratiti vreme za obradu simulacije, ali se bez upotrebe super računara ne može se govoriti o relevantnosti rezultata. Iz tih razloga dobijeni rezultati u *ANSYS*-u se odbacuju i u daljem radu ne analiziraju.

Na osnovu rezultata simulacije obrade glodanjem u *AdvantEdge* u odnosu na *ANSYS*, uočen je niz prednosti. Program *AdvantEdge* je namenski optimizovan za obradu metala rezanjem i poseduje modele alata i obratka uz mogućnost definisanja odgovarajuće geometrije. Definisanje precizne geometrije alata omogućava dobijanje pouzdanih rezultata. Takođe, program *AdvantEdge* poseduje veliku biblioteku materijala alata i obratka koji se koriste u obradi rezanjem. Postoji mogućnost adaptivnog umrežavanja što povećava tačnost rezultata. Za razliku od programa *ANSYS*, vreme potrebno za obradu simulacija u *AdvantEdge*-u je značajno kraće, i nije neophodno posedovanje super računara. Nakon kreiranja simulacija, zahvaljujući potprogramu *Tecplot*, u programu *AdvantEdge*, mogu se direktno analizirati uticaji elementa režima obrade na temperaturu rezanja. Pored prednosti *AdvantEdge*-a u odnosu na *ANSYS*, bitno je napomenuti da postoji nedostatak u tome što *AdvantEdge* pruža manje mogućnosti podešavanja od strane korisnika.

Na osnovu analize rezultata temperature u zoni rezanja pri obradi glodanjem, a koji su dobijeni eksperimentom, trofaktornim modelom drugog reda i simulacijama kreiranim u *AdvantEdge*-u može se izvesti nekoliko ključnih zaključaka. Najmanju srednju procentualnu grešku daje model dobijen na osnovu trofaktornog plana bez međusobnih uticaja, dok nešto

lošiju vrednost daje model dobijen na osnovu trofaktornog plana sa međusobnim uticajem faktora. Analiza pokazuje da simulacije kreirane u *AdvantEdge*-u, iako daju veću srednju procentualnu grešku u odnosu na oba trofaktorna modela, sa sigurnošću mogu da se koriste za predviđanje i upravljanje temperature u zoni rezanja pri obradi glodanjem.

### **Mogućnost primene dobijenih rezultata**

Sprovedena istraživanja i rezultati rada pokazali su da se modeliranjem i simulacijom procesa obrade glodanjem primenom metode konačnih elemenata može ostvariti predviđanje temperature u zoni rezanja primenom programskog paketa *AdvantEdge*. Upređivanjem sa eksperimentalnim rezultatima, simulacijama je potvrđeno da se temperatura rezanja može predvideti bez eksperimenata i da odstupanja rezultata u *AdvantEdge*-u iznose manje od 15%. Pri tome treba naglasiti da je u radu korišćen Demonstracioni mod radi kraćeg vremena potrebnog za obradu simulacija i da bi rezultati bili još precizniji u Standardnom modu.

### **Pravci daljih istraživanja**

Buduća istraživanja, u području modeliranja procesa obrade, se mogu podeliti u nekoliko različitih pravaca: implementacija u različitim vrstama obrade rezanjem, ispitivanje većeg broja izlaznih performansi obrade i njihovo poređenje sa eksperimentalnim ispitivanjima, kao i prevazilaženje problema koji se javljaju usled prethodno pomenutih ograničenja.

## 10 LITERATURA

- Agmell, M., Ahadi, A., Stahl, J. (2013): The Link Between Plasticity Parameters and Process Parameters in Orthogonal Cutting, *Procedia CIRP* 00.
- Alcaraz, J., Lorenzo, I., Lacalle, L. (2003): Thermomechanical Analysis of a Chip Machining Process. ABAQUS Users' Conference.
- ANSYS. Solution (2016): Dostupno na: <https://www.simutechgroup.com/ANSYS/Explicit-Dynamics>
- Arrazola, P., Villar, A., Ugarte, D., i Marya, S. (2014): Serrated chip prediction in Finite Element modeling of the chip formation process, *Machining Science and Technology*, (11), pp. 37–41.
- Boeraeve, P. (2010): Introduction To The Finite Element Method, Institut Gramme Liege.
- Bontiu Pop A., Lobontiu M. (2015): The finite element analysis approach in metal cutting, *Academic journal of manufacturing engineering*, 13(1).
- Box, G.E.P, Wilson K.B. (1951): On Experimental Attainment of Optimum Conditions, *Ronal Stat. Soc.*, B, 13(1)
- Brandao, L.C., Coelho, R.T., Rodrigues, A.R. (2008): Experimental and theoretical study of workpiecetemperature when end milling hardened steels using (TiAl)N-coated and PcBN-tipped tools, *J.of Mat. Process. Tech.* 199, pp. 234-244.
- Calamaz, M., Coupard, D., Nouari, M., Girot, F. (2011): Numerical analysis of chip formation and shear localisation processes in machining the Ti6Al4V titanium alloy, *Int J Adv Manuf Technol*, 52(9), pp. 887-895.
- Chem, G.L. (2006): Experimental observation and analysis of burr formation mechanisms in face milling of aluminum alloys. *Int. J. Mach. T. Manuf.* 46(12/13), pp. 1517-1525.
- Constantin, C., Bisu, C., Croitoru, S., Constantin, G. (2010a): Milling Analysis by 3D FEM and experimental tests, ISSN 1726-9679, *Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium*, 21(1) , ISSN 1726-9679
- Constantin, C., Croitoru, S., Constantin, G., Bisu, C. (2010b): 3D FEM Analysis of Cutting Processes, *Advances in visualization, imaging and simulation* , ISSN: 1792-6130
- Constantin, C., Croitoru, S., Constantin, G., Străjescu, E. (2012): FEM tools for cutting process modelling and simulation, *UPB Scientific Bulletin, Mechanical engineering*.
- Davoodi, B., Hosseinzadeh, H. (2012): A new method for heat measurement during high speed machining. *Measurement* 45(8), pp. 2135-2140.
- Ducobu, F., Lorphevre, E.R., Filippi, E. (2012): Chip Formation in Micro-cutting, 9th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Brussels.
- Escamilla, I., Zapata, O., Gonzalez, B., Gámez, N., Guerrero, M. (2010): 3D Finite Element Simulation of the Milling Process of a Ti6Al4V Alloy, *SIMULIA Customer Conference*.
- ExpertFEA (2016). Dostupno na: <http://expertfea.com>

Fedorov, D., Skuratov, D. (2014): Thermal Stress Research of Processing and Formation of Residual Stress When End Milling of a Workpiece, *World Applied Sciences Journal*, ISSN 1818-4952, pp.51-55.

FLIR Systems. Dostupno na:

[http://www.datcon.si/sites/default/files/privici/infracam\\_sd\\_datasheet.pdf](http://www.datcon.si/sites/default/files/privici/infracam_sd_datasheet.pdf)

Gostimirovic, M., Kovac, P., Sekulic, M., Savkovic B. (2011): An Inverse Heat Transfer Method For Determination Of The Workpiece Temperature In Grinding, *Journal of Production Engineering*, 1, pp. 5-8, ISSN 1821- 4932. FTN Novi Sad.

Grzesik, W.(2000): The influence of thin hard coatings on frictional behaviour in the orthogonal cutting process, *Tribology International*, 33, 131-140.

Grzesik, W., Bartoszuk, M., Nieslony, P. (2004): Finite difference analysis of the thermal behaviour of coated tools in orthogonal cutting of steels, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(14), pp. 1451-1462.

Grzesik, W., Nieslony, P. (2004 a): Prediction of friction and heat flow in machining incorporating thermophysical properties of the coating–chip interfac, *Wear*, 256(1-2), pp. 108-117.

Grzesik, W., Nieslony, P. (2004 b): Physics based modelling of interface temperatures in machining with multilayer coated tools at moderate cutting speeds, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(9), pp. 889-901.

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).

Huebner, K., Dewhurst, D., Smith, E., Byrom T. (2001): *The finite element method for engineers*, John Wiley & Sons.

Johnson, G.R., Cook, W.H. (1983): A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures-. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics*, The Hague, The Netherlands, April 19–21, pp. 541–547.

Kadirgama, K., Noor, M.M., Rahman, M.M., Abou-El-Hossein, K.A., Mohammad and H. Habeeb, B. (2009): Effect of Milling Parameters on Frictions when Milling Hastelloy C-22HS: A FEM and Statistical Method, *Trends in Applied Sciences Research*, 4, pp. 216-228.

Kadirgama, K., Noor, M., Rahman, M., Harun, W., Haron, C. (2009): Finite Element Analysis and Statistical Method to Determine Temperature Distribution on Cutting Tool in End-Milling, *European journal of scientific research*.

Kim, J. H., Park, J. W., Ko, T. J.: (2008). End mill design and machining via cutting simulation. *Computer-Aided Design*, 40, 324–333.

Klamecki, B.E. (1973): Incipient chip formation in metal cutting-a three dimension finite element analysis. Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Klocke, F.(2008): *Finite Element Simulation of Cutting Processes*, WZL/Fraunhofer IPT.

Komanduri, R., Hou, Z.B. (2001): A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology, *Tribology International*, 34, pp. 653–682

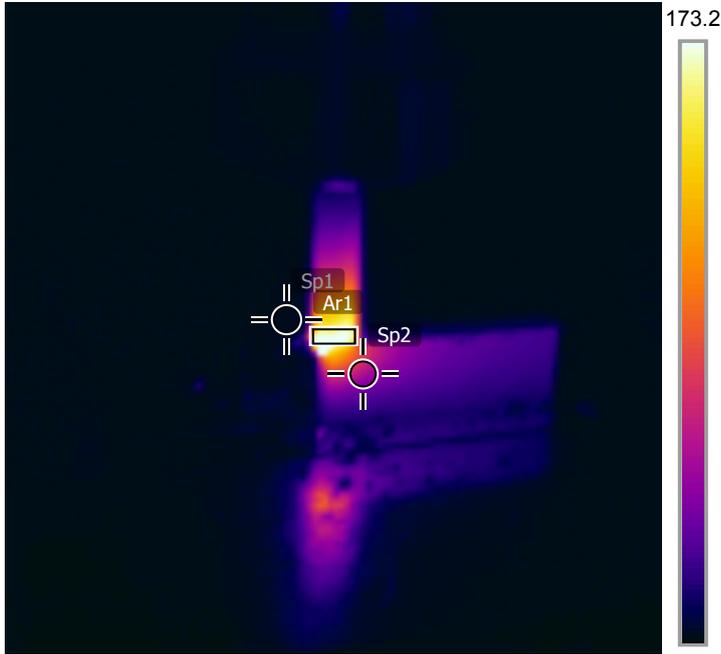
- Kovač, P. (1987): Istraživanje podloga za upravljanje procesom čeonog glodanja, Doktorska disertacija, FTN, Novi Sad.
- Kovač, P.(1988): Podloge za upravljanje procesom čeonog glodanja, Monografija, Univerzitet u Novom Sadu, FTN izdavaštvo, Novi Sad.
- Kovač, P. (2011): Metode planiranja i obrade eksperimenta, FTN, Novi Sad.
- Kovač, P., Gostimirović, M., Sekulić, M., Savković B.(2011 a): A Rewiev To Advanced Modeling And Simulation Of Machining Process, Journal of Production Engineering, 12(1), pp. 17-22, ISSN 1821- 4932. FTN Novi Sad.
- Kovač, P., Gostimirović, M., Sekulić, M., Savković B. (2011 b): A Review Of Research Related To Advancing Manufacturing Techology, Journal of Production Engineering, 12(1), pp. 9-16, ISSN 1821- 4932. FTN Novi Sad.
- Kovač, P., Mankova, I., Gostimirovic, M., Sekulic, M., Savković, B. (2011 a): A Revew Of The Experimental Techniques For The Measurement Of Temperature Generated In Material Removal Processes, Journal of Production Engineering, 13(1), pp. 1-6, ISSN 1821-4932, FTN Novi Sad.
- Kovač, P., Mankova I., Gostimirović, M., Sekulić, M., Savković, B.(2011 b): A Review of Machining Monitoring Systems, 14(1), pp. 1-6, FTN, Novi Sad.
- Kovač, P., Milikić, D. (1998): Rezanje metala, Univerzitet u Novom Sadu, FTN izdavaštvo, Novi Sad.
- Kovač, P., Savković, B., Kulundžić, N., Gostimirović, M., Hloešovskyy, 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.
- Kuczmaszewski, J., Zagórski, I. (2013): Methodological Problems of Temperature Measurement In The Cutting Area During Milling Magnesium Alloys. Management and Production Engineering Review, 4(3), pp. 26–33.
- 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.
- Kulundžic, N., Kovač, P., Savković, B., Soos, Lj., Rokosz K. (2013): FEM simulation of cutting processes. Scientific Proceedings, Faculty of Mechanical Engineering, STU Bratislava, 21(1), pp. 121-130.
- Kulundžić, N., Kovač, P., Savković, B. (2013): Simulacija obrade rezanja u programskom paketu ANSYS. Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka. 1/2013. pp. 13-16.
- Lazard, M., Corvisier, P. (2004): Modeling of a tool during turning Analytical prediction of the temperature and of the heat flux at the tool's tip, Applied Thermal Engineering, 24(5-6), pp. 839-849.
- Lazić, M. (1979): Obrada metala rezanjem, Mašinski fakultet Kragujevac.
- Lazoglu, I., Altintas, Y. (2002): Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(9), pp. 1011-1022.
- Lauro, C., Brandão, L., Ribeiro, S. (2013): Monitoring the temperature of the milling process using infrared camera: Scientific Research and Essays. 8(23), pp. 1112-1120.

- 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.
- Lin, C.Z., Lin, Y.Y. (1999): Fundamental modeling for oblique cutting by thermo-elastic-plastic FEM, *International Journal of Mechanical Sciences*, 41(8), pp. 941-965.
- Mankova, I., Kovac, P., Kundrak, J., Beňo, J. (2011): Finitie Element Analysis of Hardened Steel Cutting, *Journal of Production Engineering*, 14(1), pp. 7-10, ISSN 1821-4932. FTN Novi Sad.
- Manokhin, A.C., Klimenko, S.A., Melniichuk, Y.A. (2011): The Stressed - Strained State in the Chip Forming Zone during the Finish Turning of Workpieces of Hardened Steels, *Journal of Superhard Materials*, 33(5), pp. 333-339.
- Medina, N., Lambea, P., Manjabaca, M.C., Miguel, V., Martinez-Martinez, A., Coello, J. (2016): Evaluating Temperature In Faced Milling Operations By Infrared Thermography. *Termal Science, International Scientific Journal*, 3(20)
- Messner, G. (2007): Modeling Metal Cutting Processes Under Consideration of Elastic Material Properties, *Dissertation aus dem Werkzeugmaschinenlabor, Düsseldorf*.
- Milikić, D. (1980): Nova metoda za merenje temperatura pri obradi rezanjem i mogućnosti njene tehnološke i senzorske primene, *Doktorska disertacija, FTN, Novi Sad*,
- Milikić, D., Gostimirović, M., Sekulić, M. (2008): *Osnove tehnologije obrade rezanjem, Univerzitet u Novom Sadu, FTN izdavaštvo, Novi Sad*.
- Ming, C., Fanghong, S., Haili, W., Renwei, Y., Zhenghong, Q., Shuquiao, Z. (2003): Experimental research on the dynamic characteristics of the cutting temperature in the process of high speed milling. *J. Mat. Process. Tech.*
- Mitrović, A., Kovač, P., Kulundžić, N., Savković, B. (2016 a): Modelovanje i simulacija procesa obrade glodanjem, *JUPITER konferencija 2016, Mašinski fakultet Beograd*.
- Mitrović A., Kovač P., Kulundžić N., Savković B. (2016 b): Analiza toplotnih pojava pri obradi glodanjem metodom konačnih elemenata, *Tehnika i praksa*, 15, pp. 147-152, ISSN 2217-2130, VSTSS, Čačak.
- 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.
- Nedić, B., Lazić, M.(2007): *Proizvodne tehnologije, Mašinski fakultet Kragujevac*.
- 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).
- Nikishkov, P. (2004): *Introduction to the finite element method, University of Aizu, Japan*.
- O'Sullivan, D., Cotterell, M. (2001): Temperature measurement in single point turning, *Journal of Materials Processing Technology* 118, pp. 301-308.
- Oxley, P.L.B. (1990): The mechanics of machining: an analytical approach to assessing machinability, *Journal of Applied Mechanics*, 57(1).

- Ozel, T., Zeren, E. (2007): Finite element modelling the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high speed machining, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 35, pp. 255-267.
- Pantel, A., Fontaine, M., Thibaud, S., Gelin, J. (2008): Experiments and 3d FEM simulations of milling on a 304L stainless steel, *Steel research international*.
- Pittalà, G.M., Monno, M. (2010): A new approach to the prediction of temperature of the workpiece of face milling operations of Ti6Al4V, *Applied Thermal Engineering*. 31(2-3), pp. 173-180.
- Proudian, J. (2012): Simulating Residual Stress in Machining; From Post Process Measurement to Pre-Process Predictions, M.Sc. thesis, Royal Institute of Technology.
- Rao, S.S. (2004): The finite element method in engineering, Elsevier Science & Technology Books, ISBN: 0750678283.
- Reddy, G., Reddy, E., Kumar, C., Ashwin, S., Prasad, D. (2014): 3D Finite Element Analysis of milling operation on AISI 420 SS using DEFORM 3D, *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 2(1), ISSN: 2320-2092
- Savković, B. (2015): Modeliranje funkcija obradivosti pri procesu obrade glodanjem, Doktorska disertacija, FTN, Novi Sad.
- 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
- SolidWorks. 2016 Dostupno na: [https://www.solidworks.com/sw/656\\_ENU\\_HTML.htm](https://www.solidworks.com/sw/656_ENU_HTML.htm)
- SolidWorks Fact Sheet. Dostupno na: [https://www.solidworks.com/sw/docs/3DS\\_2016\\_SWK\\_CorpFactSheet\\_2015\\_2H.pdf](https://www.solidworks.com/sw/docs/3DS_2016_SWK_CorpFactSheet_2015_2H.pdf)
- Solutions. ANSYS CAD Support for ANSYS Workbench Platform. 2016. Dostupno na: <http://www.ansys.com/Solutions/Solutions-by-Role/IT-Professionals/Platform-Support/Previous-Releases>
- Soo, S.L., Dewes, R.C., Aspinwall, D.K. (2010): 3D FE modelling of high-speed ball nose end milling, *Int J Adv Manuf Technol*, 50(9), pp. 871-882.
- Stanić, J. (1983): Uvod u teoriju tehnokonomске optimizacije procesa, Mašinski fakultet Beograd.
- Stanić, J. (1994): Teorija procesa obrade, Mašinski fakultet, Beograd.
- Sui, X., Liu, X., Wang, D. (2014): Development and Analysis of Milling Model Coupled Thermal- Mechanical, *International Journal of Smart Home*, 8(2), pp. 211-216.
- Supercompute World. Dostupno na: <http://www.computerworld.com/article/3085483/high-performance-computing/china-builds-world-s-fastest-supercomputer-without-u-s-chips.html>
- Sato, M., Ramura, N., Tanaka, H. (2011): Temperature variation in the cutting tool in end milling. *J. Manu. Sc. Eng.* 133, pp. 1-7.
- 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.
- 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

- Sutter, G., Faure, L., Molinari, A., Ranc, N., Pina, V. (2003): An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining. *Int. J. Mach. Technol. Manuf.* 43(7), pp. 671-678.
- Tamizharasan, T., Senthilkumar, 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.
- Tănas, I., Popovici, V., Ceau, G., Predinca, N. (2012): Cutting edge temperature prediction using the process simulation with deform 3D software package, *Proceedings in Manufacturing Systems*, 7(4), pp. 265-268.
- Tickoo, S. (2015): *SolidWorks 2015 za mašinske inženjere*, ISBN: 978-86-7555-410-3, Mikro knjiga.
- Tool life testing in milling — End milling, ISO 8688-2:1989
- Ueda, T., Hosokawa, A., Oda, K., Yamada, K. (2001): Temperature on flank face of cutting tool in high speed milling. *Annals of the CIRP* 50/1, pp. 37-40.
- Urošević, S. (1984): *Proizvodno mašinstvo*, Naučna knjiga, Beograd.
- Vaz, M. (2000): On the Numerical Simulation of Machining Processes, *J. Braz. Soc. Mech. Sci.* 22(2).
- Wang, J., Gong, Y., Abba, G., Antoine, J.F., Shi, J. (2009): Chip formation analysis in micromilling operation, *Int J Adv Manuf Technol*, 45(5), pp. 430-447.
- Wedberg, D. (2013): *Modelling of High Strain Rate Plasticity and Metal Cutting*, PhD thesis, Lulea University of Technology.
- Yang, Y., Li, J.F. (2001): Study on mechanism of chip formation during high-speed milling of alloy cast iron, *Int J Adv Manuf Technol*, 46(1), pp. 43-50.
- Yaseen, S.J. (2012): Theoretical study of temperature distribution and heat flux variation in turning process, *Al-Qadisiya Journal for Engineering Sciences*, 5(3), pp. 299-313.
- Young, H.-T. 1996: Cutting temperature responses to flank wear, *Wear* 2001, pp. 117-120
- Zgorniak, P., Grdulska, A. (2012): Investigation of Temperature Distribution during Milling Process of AZ91HP Magnesium Alloys, *Mechanics and Mechanical Engineering* 16(1).
- Zerilli, F., Armstrong, R. (1988): Dislocation mechanics based constitutive relations for materials dynamics calculations, *Journal of Applied Physics*, 49(C3), pp.C3-529-C3-534.

5/12/2016 6:07:15 PM



IR\_0061.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	222.9
	Min	148.3
	Average	174.5
Sp1		25.0
Sp2		83.4

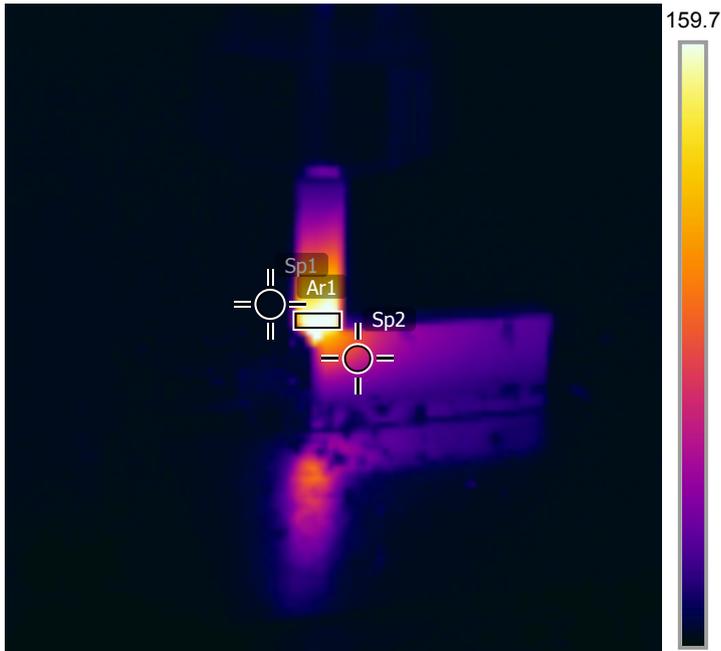
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 5 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,10 m/s  
Korak po zubu sz= 0,025 mm/z  
Dubina rezanja a= 1,41 mm

5/12/2016 6:08:41 PM



IR\_0062.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	180.9
	Min	95.7
	Average	152.3
Sp1		24.8
Sp2		88.1

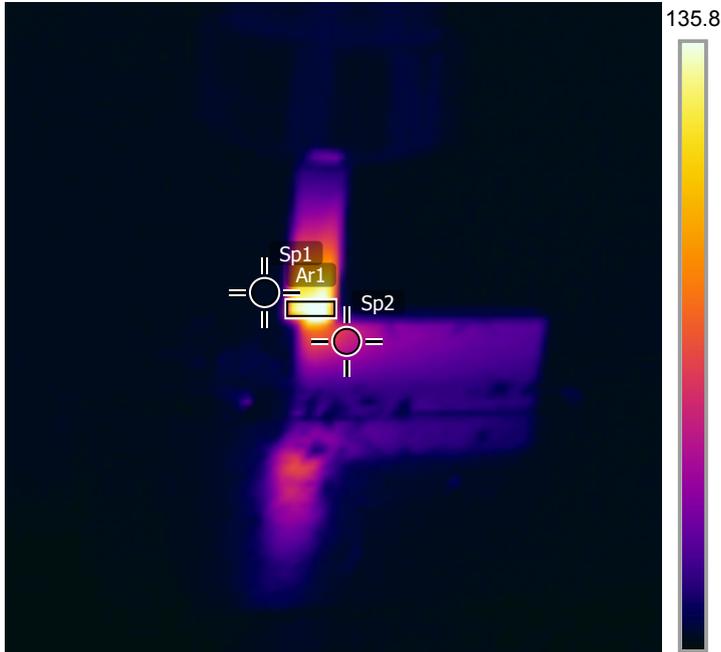
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 6 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,23 m/s  
Korak po zubu sz= 0,025 mm/z  
Dubina rezanja a= 1,41 mm

5/12/2016 6:10:07 PM



IR\_0063.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	142.7
	Min	79.7
	Average	127.1
Sp1		24.8
Sp2		75.2

### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 7 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,10 m/s  
Korak po zubu sz= 0,031 mm/z  
Dubina rezanja a= 1,41 mm

22.1

### Measurements

°C

Ar1	Max	166.6
	Min	80.4
	Average	142.6
Sp1		25.0
Sp2		71.5

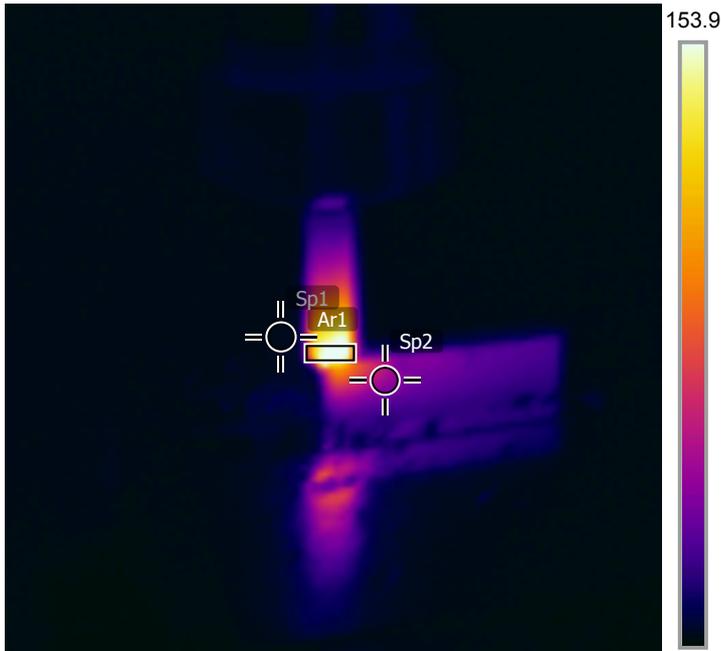
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 8 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,23 m/s  
Korak po zubu sz= 0,031 mm/z  
Dubina rezanja a= 1,41 mm

5/12/2016 6:10:58 PM



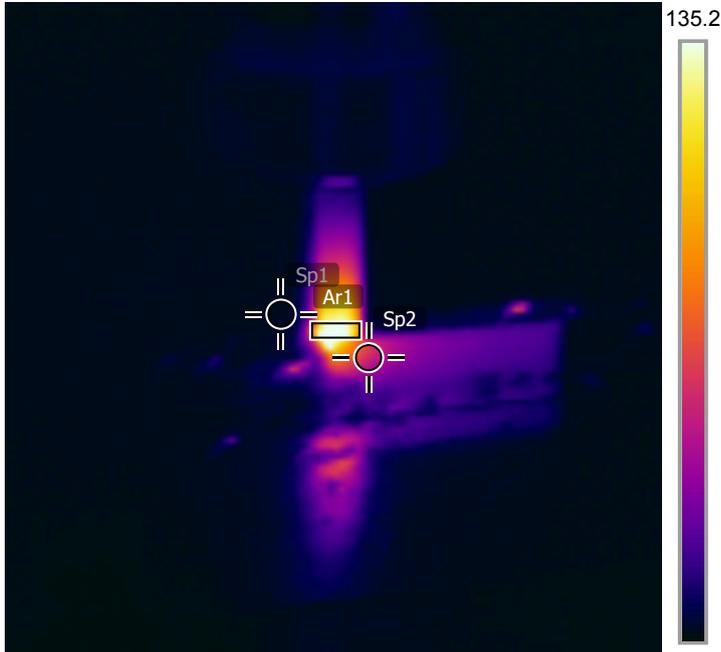
IR\_0064.jpg

InfraCAM Wester

278002235

22.0

5/12/2016 6:12:41 PM



IR\_0065.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	147.0
	Min	91.4
	Average	127.5
Sp1		25.0
Sp2		77.0

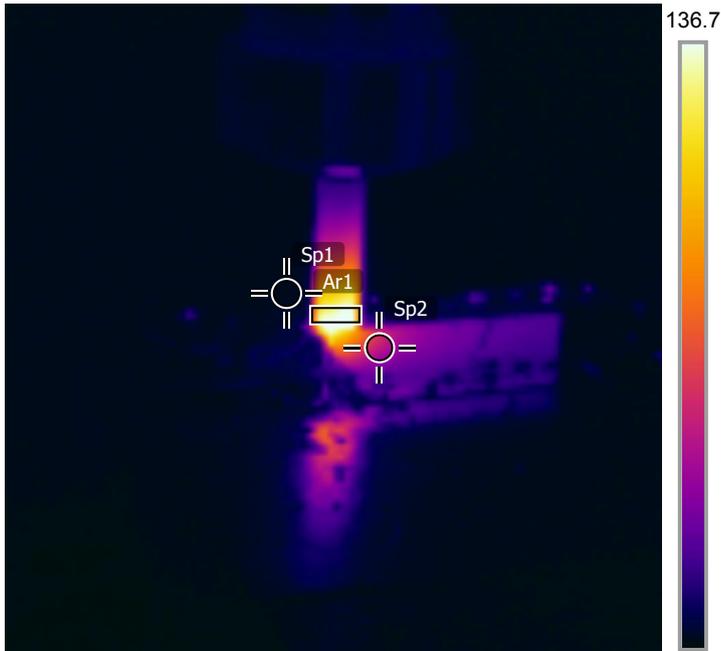
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 9 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,15 m/s  
Korak po zubu sz= 0,028 mm/z  
Dubina rezanja a= 1,00 mm

5/12/2016 6:13:52 PM



IR\_0066.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	143.0
	Min	93.6
	Average	128.6
Sp1		24.6
Sp2		72.0

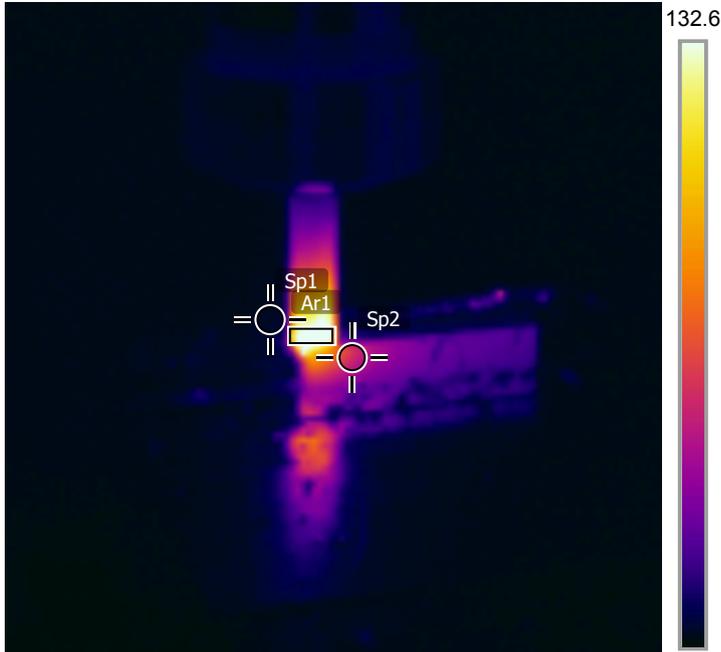
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 10 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,15 m/s  
Korak po zubu sz= 0,028 mm/z  
Dubina rezanja a= 1,00 mm

5/12/2016 6:14:53 PM



IR\_0067.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	144.7
	Min	90.1
	Average	130.2
Sp1		26.2
Sp2		76.4

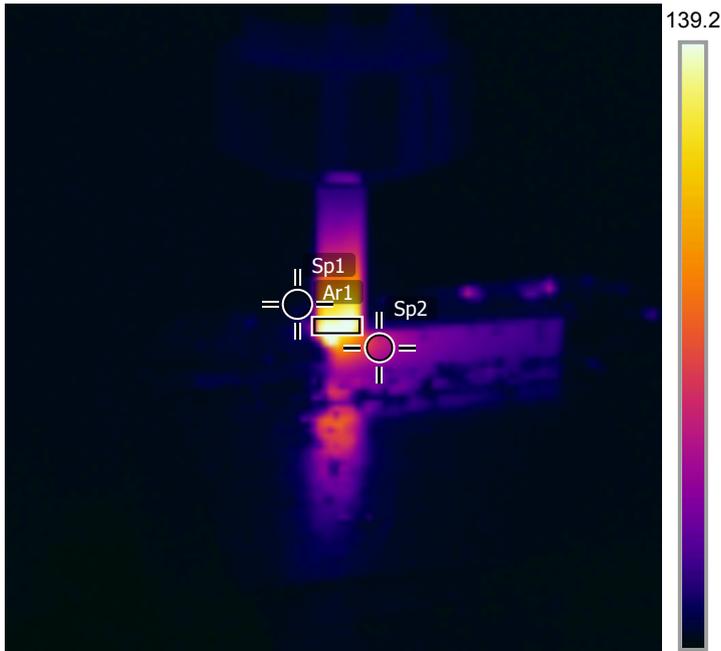
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 11 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,15 m/s  
Korak po zubu sz= 0,028 mm/z  
Dubina rezanja a= 1,00 mm

5/12/2016 6:16:08 PM



IR\_0068.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	153.4
	Min	75.3
	Average	132.0
Sp1		26.5
Sp2		74.9

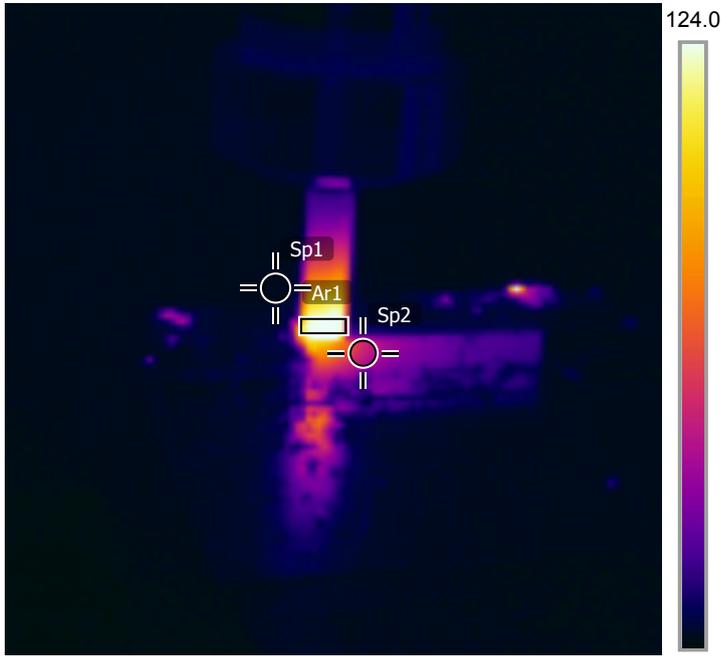
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 12 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,15 m/s  
Korak po zubu sz= 0,028 mm/z  
Dubina rezanja a= 1,00 mm

5/12/2016 6:18:04 PM



IR\_0069.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	135.1
	Min	67.8
	Average	119.5
Sp1		24.5
Sp2		69.0

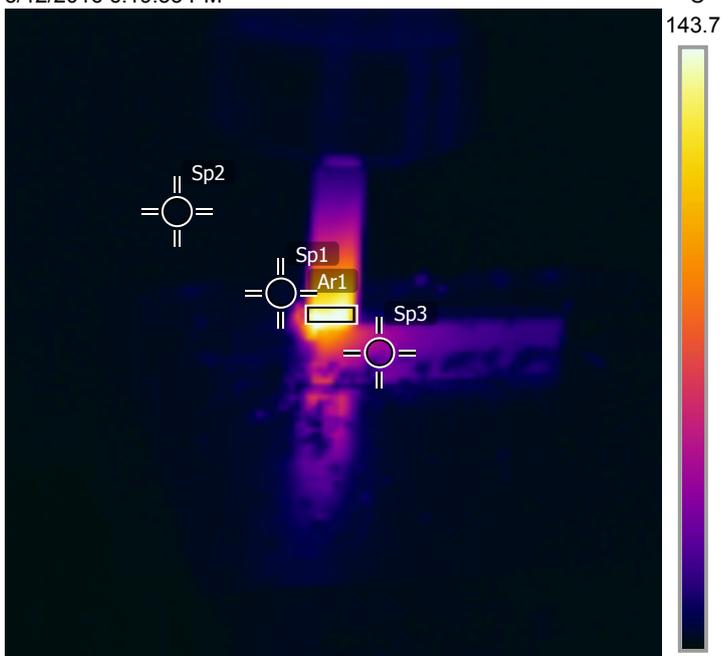
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 13 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,05 m/s  
Korak po zubu sz= 0,028 mm/z  
Dubina rezanja a= 1,00 mm

5/12/2016 6:19:33 PM



IR\_0070.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	150.8
	Min	116.2
	Average	139.8
Sp1		26.3
Sp2		23.9
Sp3		57.6

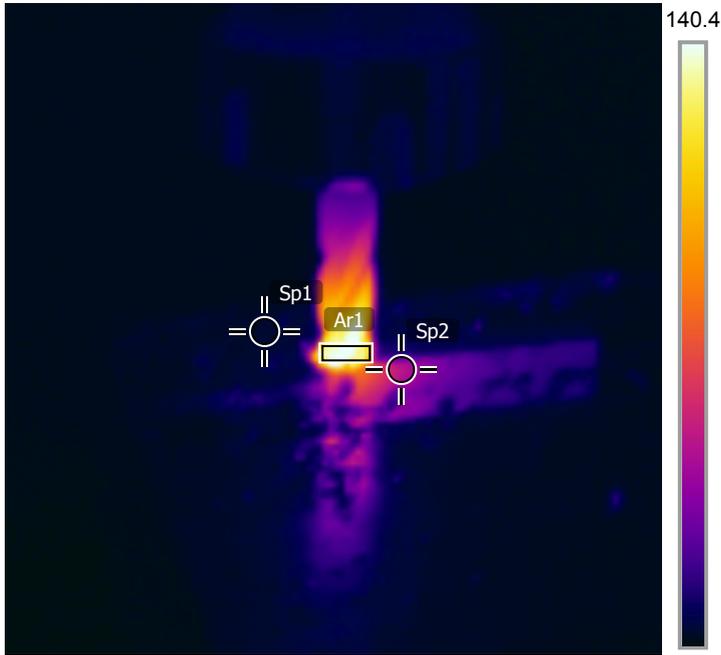
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 14 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,31 m/s  
Korak po zubu sz= 0,028 mm/z  
Dubina rezanja a= 1,00 mm

5/12/2016 6:20:45 PM



IR\_0071.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	150.0
	Min	115.0
	Average	137.4
Sp1		26.8
Sp2		73.2

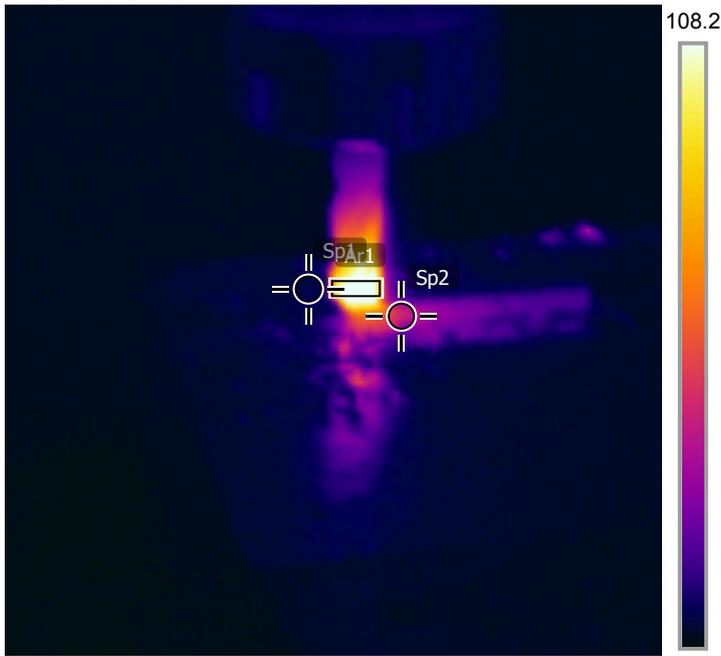
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 15 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,15 m/s  
Korak po zubu sz= 0,021 mm/z  
Dubina rezanja a= 1,00 mm

5/12/2016 6:21:52 PM



IR\_0072.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	119.2
	Min	92.9
	Average	108.9
Sp1		28.0
Sp2		61.6

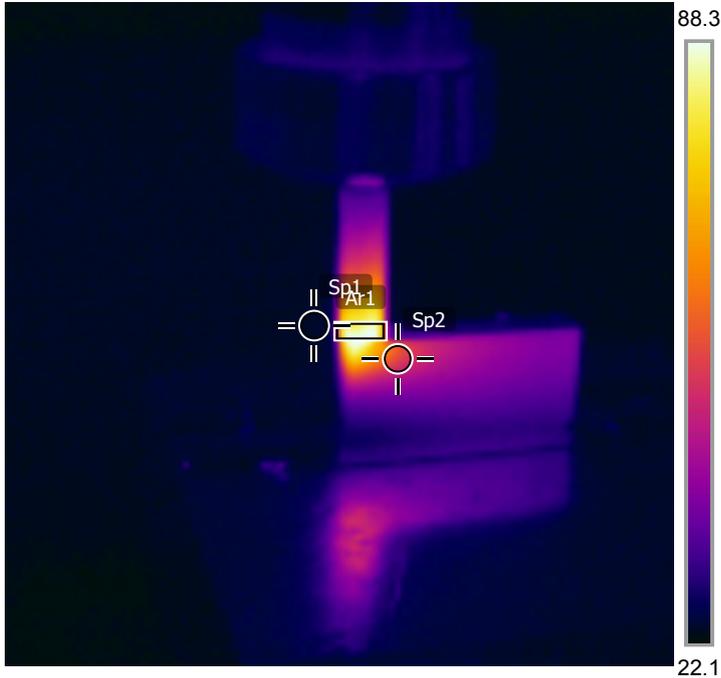
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 16 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,15 m/s  
Korak po zubu sz= 0,035 mm/z  
Dubina rezanja a= 1,00 mm

5/12/2016 6:24:01 PM



IR\_0073.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	91.7
	Min	45.0
	Average	80.8
Sp1		24.1
Sp2		57.4

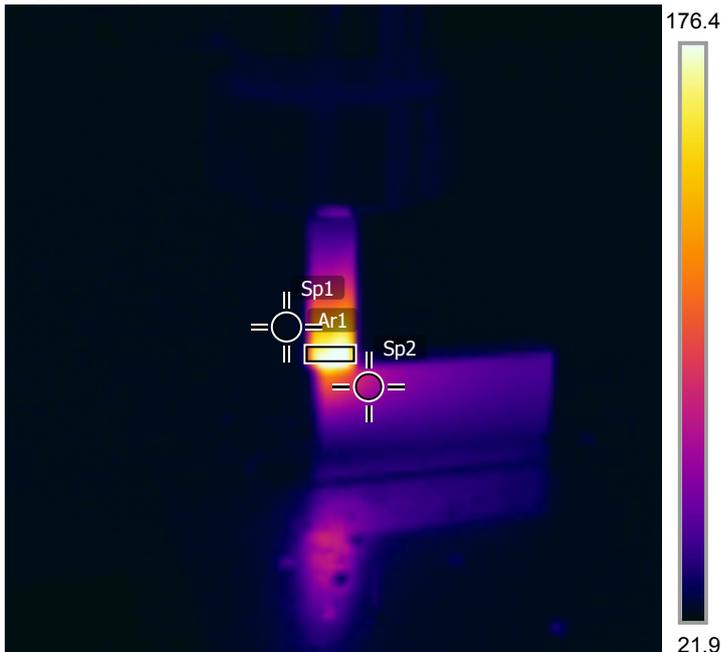
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 17 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,15 m/s  
Korak po zubu sz= 0,028 mm/z  
Dubina rezanja a= 0,50 mm

5/12/2016 6:24:51 PM



IR\_0074.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	187.5
	Min	114.4
	Average	167.5
Sp1		25.2
Sp2		86.6

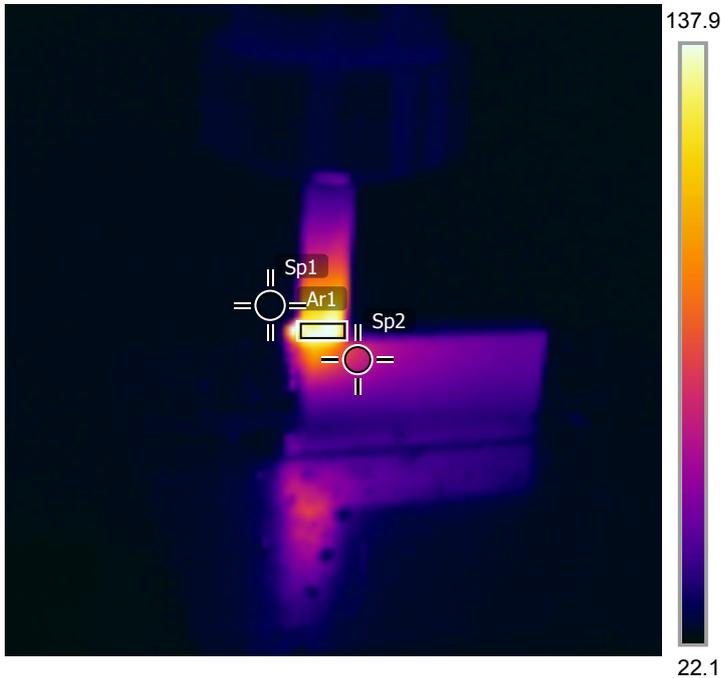
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 18 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja v= 1,15 m/s  
Korak po zubu sz= 0,028 mm/z  
Dubina rezanja a= 2,00 mm

5/13/2016 4:55:10 PM



IR\_0075.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	169.1
	Min	116.7
	Average	137.5
Sp1		24.4
Sp2		76.9

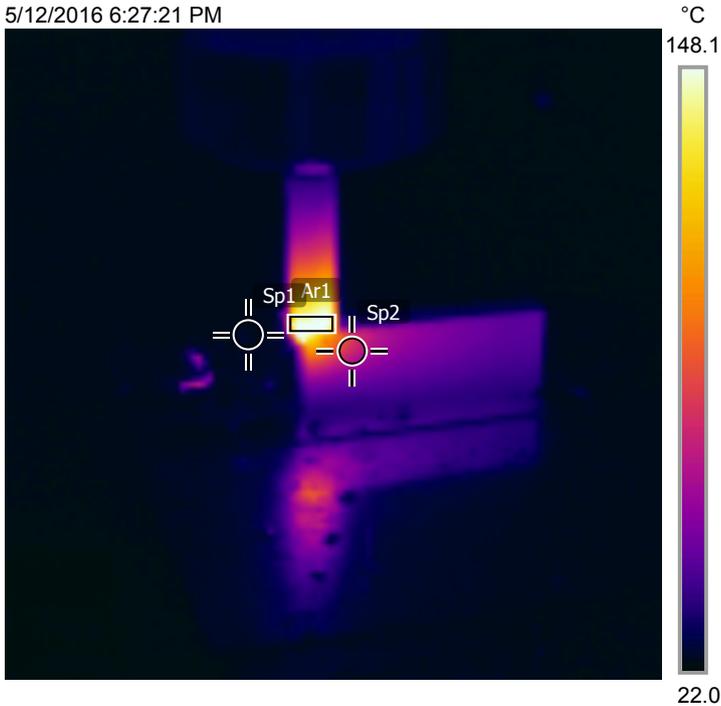
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 19 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja  $v = 1,05$  m/s  
Korak po zubu  $sz = 0,028$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 6:27:21 PM



IR\_0076.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	156.9
	Min	128.8
	Average	147.6
Sp1		26.1
Sp2		82.6

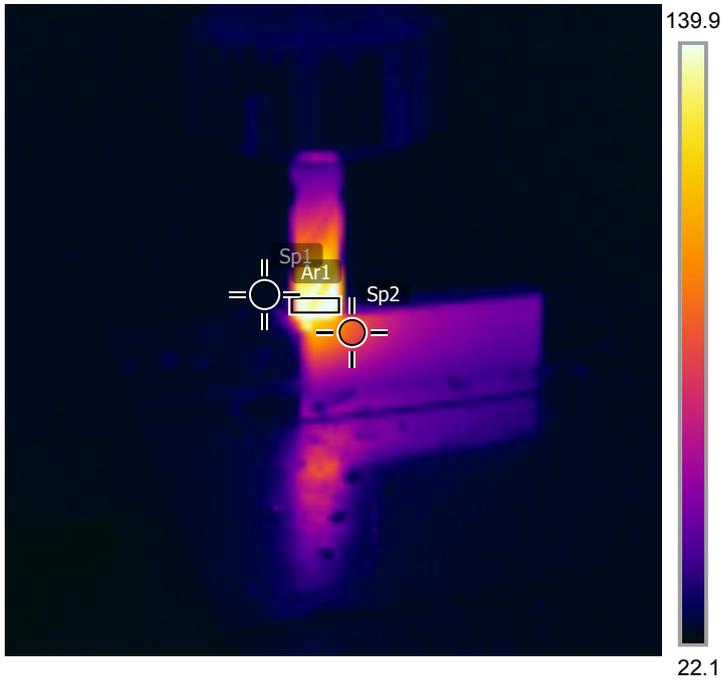
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 20 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja  $v = 1,31$  m/s  
Korak po zubu  $sz = 0,028$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 6:28:35 PM



IR\_0077.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	158.4
	Min	74.5
	Average	134.5
Sp1		25.1
Sp2		93.3

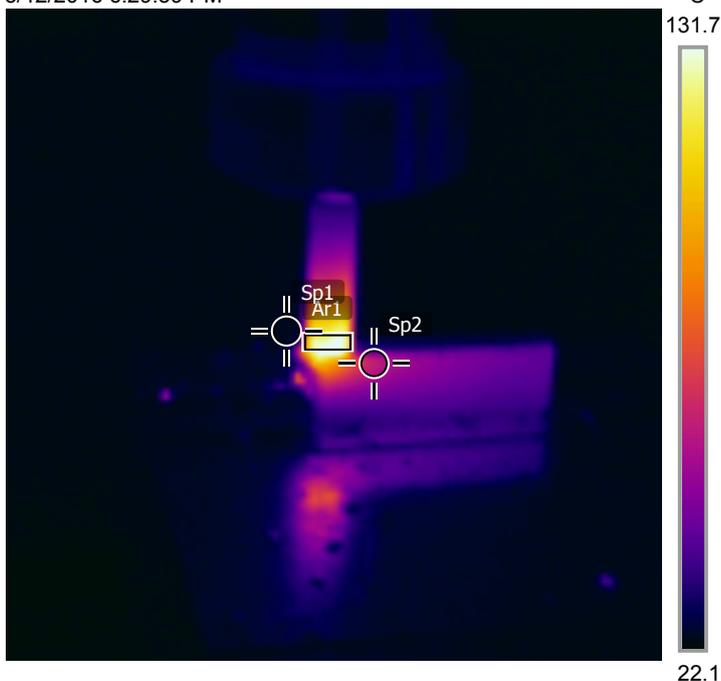
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 21 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja  $v = 1,15$  m/s  
Korak po zubu  $sz = 0,021$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 6:29:39 PM



IR\_0078.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	140.8
	Min	64.0
	Average	118.3
Sp1		24.9
Sp2		72.1

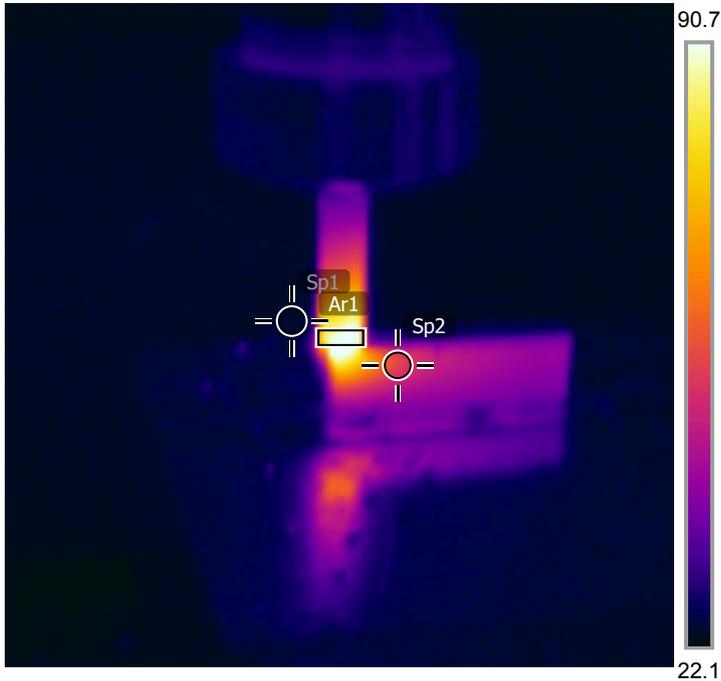
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 22 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja  $v = 1,15$  m/s  
Korak po zubu  $sz = 0,035$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 6:30:35 PM



IR\_0079.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	96.8
	Min	74.0
	Average	88.9
Sp1		24.4
Sp2		58.4

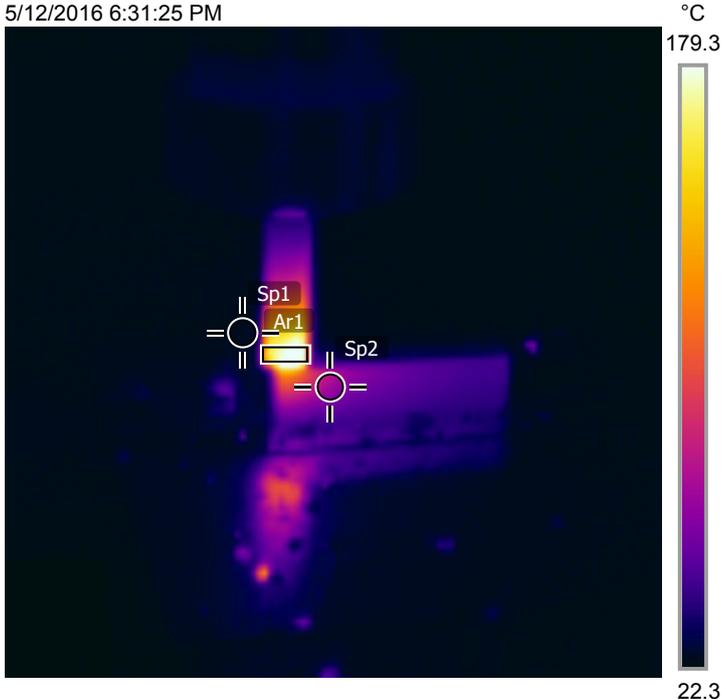
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 23 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja  $v = 1,15$  m/s  
Korak po zubu  $sz = 0,028$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 0,50$  mm

5/12/2016 6:31:25 PM



IR\_0080.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	188.0
	Min	135.5
	Average	173.5
Sp1		25.6
Sp2		82.8

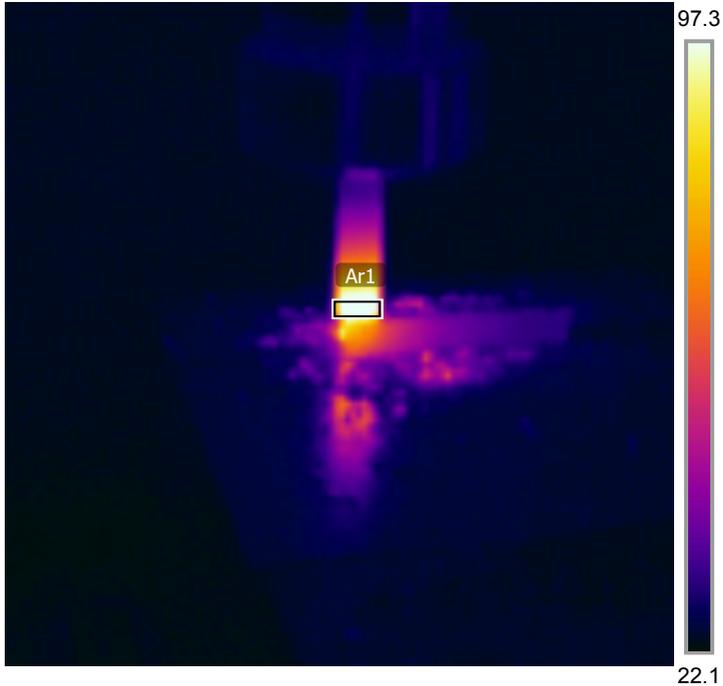
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od tvrdog metala  
Režim obrade broj 24 (tabela 5.5)  
Brzina rezanja  $v = 1,15$  m/s  
Korak po zubu  $sz = 0,028$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 2,00$  mm

5/12/2016 7:45:23 PM



IR\_0085.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

		°C
Ar1	Max	109.3
	Min	71.9
	Average	100.6

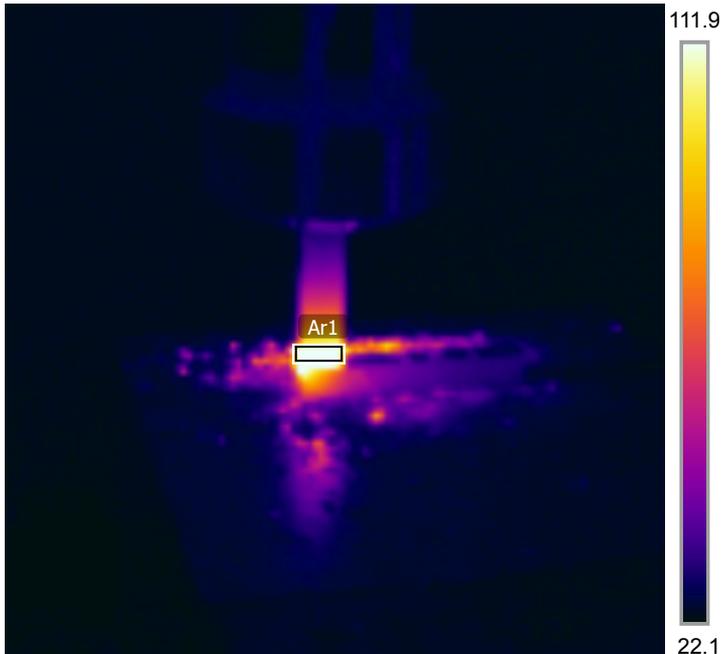
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 5 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,27$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,044$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,41$  mm

5/12/2016 7:47:32 PM



IR\_0086.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

		°C
Ar1	Max	130.3
	Min	106.3
	Average	121.5

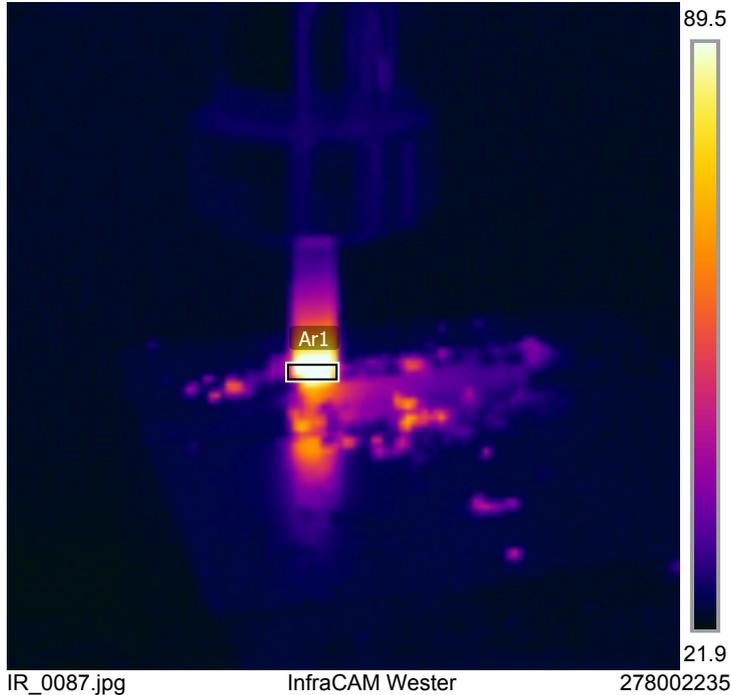
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 6 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,31$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,044$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,41$  mm

5/12/2016 7:49:44 PM



### Measurements

		°C
Ar1	Max	104.7
	Min	50.6
	Average	90.6

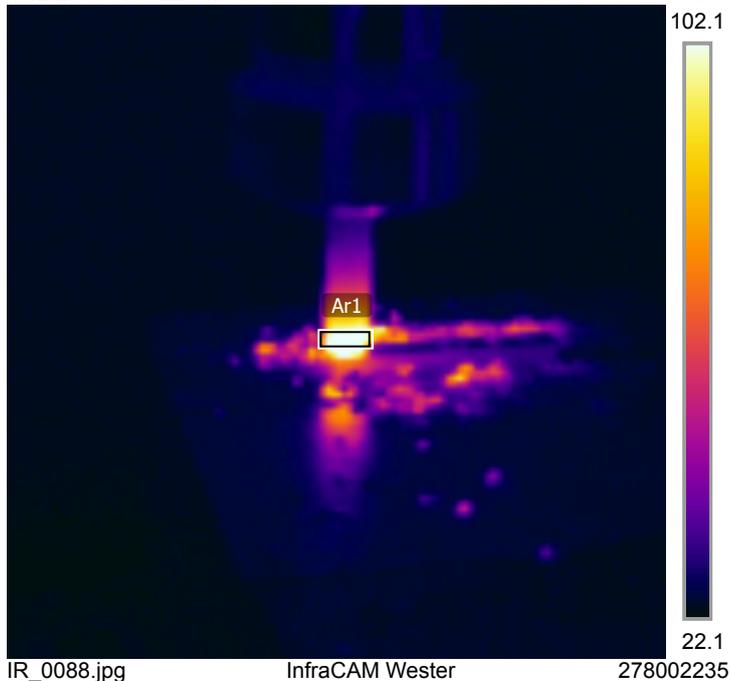
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 7 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,27$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,063$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,41$  mm

5/12/2016 7:51:22 PM



### Measurements

		°C
Ar1	Max	115.7
	Min	59.9
	Average	102.0

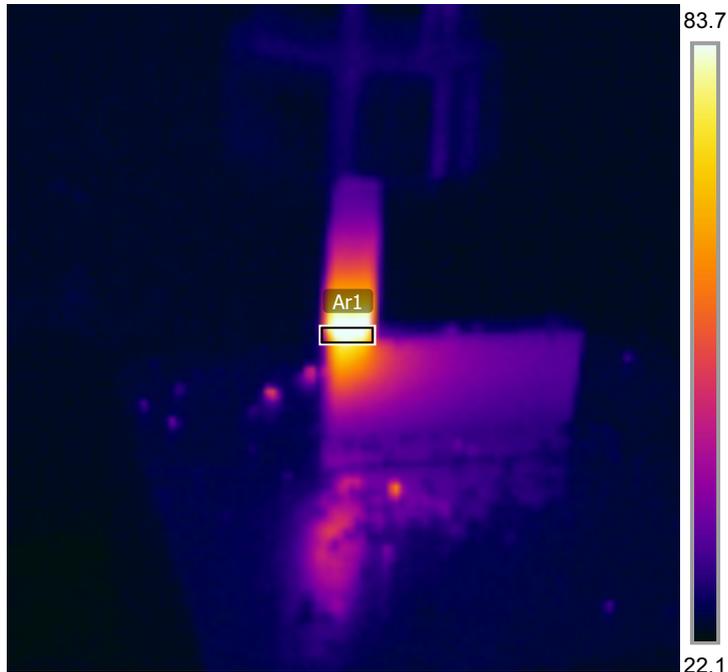
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 8 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,31$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,063$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,41$  mm

5/12/2016 7:53:31 PM



IR\_0089.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

		°C
Ar1	Max	90.2
	Min	40.1
	Average	78.8

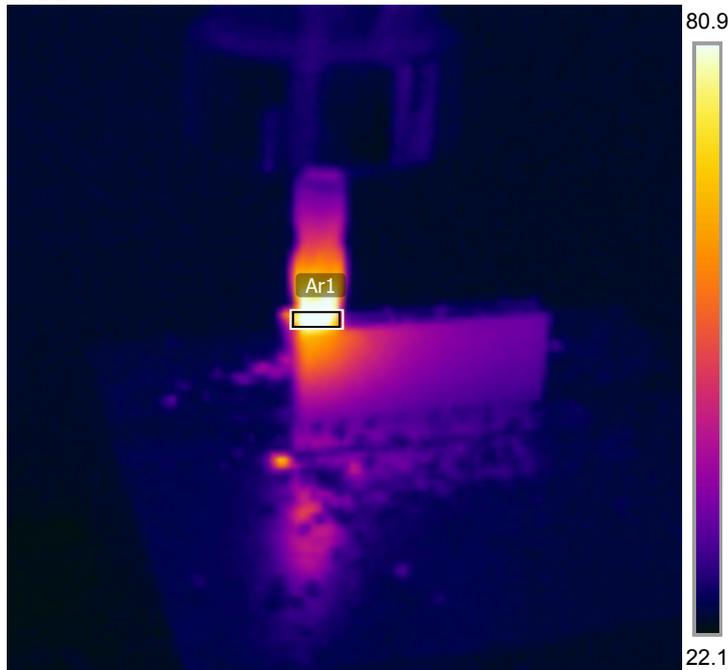
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 9 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,29$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,045$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 7:55:05 PM



IR\_0090.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

		°C
Ar1	Max	88.4
	Min	49.7
	Average	79.1

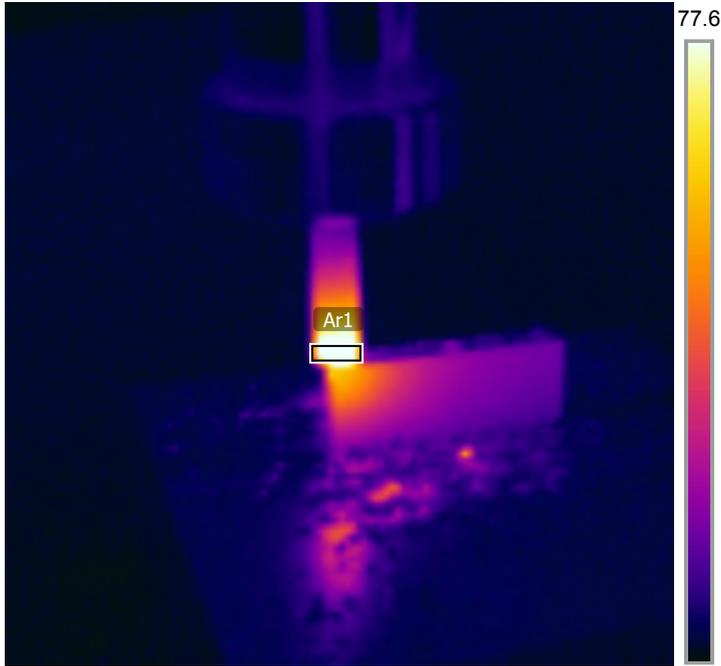
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 10 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,29$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,045$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 7:56:45 PM



IR\_0091.jpg

InfraCAM Wester

22.1  
278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	86.0
	Min	52.0
	Average	77.9

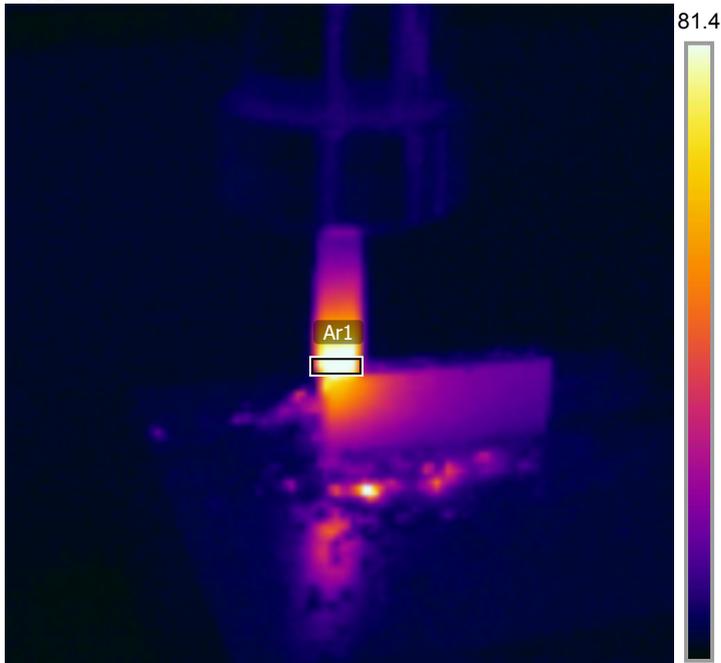
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 11 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,29$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,045$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 7:58:31 PM



IR\_0092.jpg

InfraCAM Wester

22.0  
278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	89.8
	Min	42.0
	Average	79.8

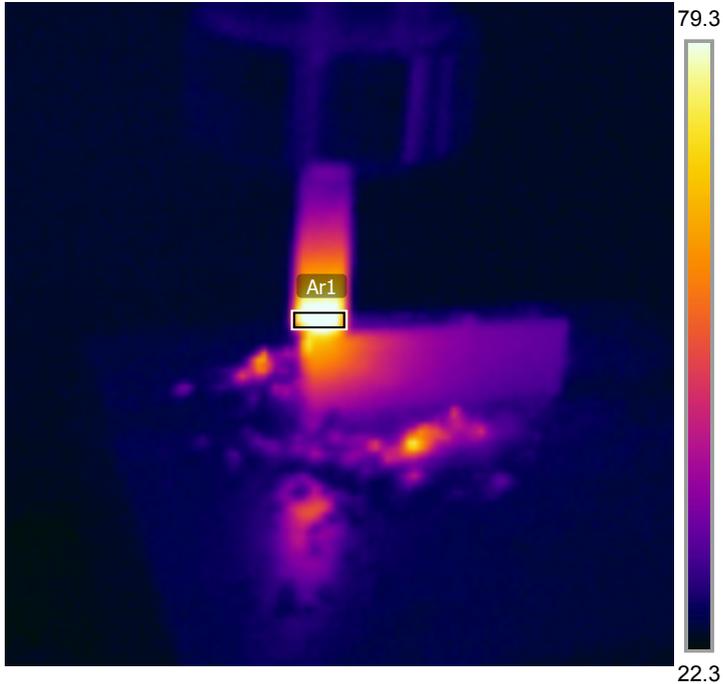
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 12 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,29$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,045$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 8:00:14 PM



IR\_0093.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	85.5
	Min	62.6
	Average	80.0

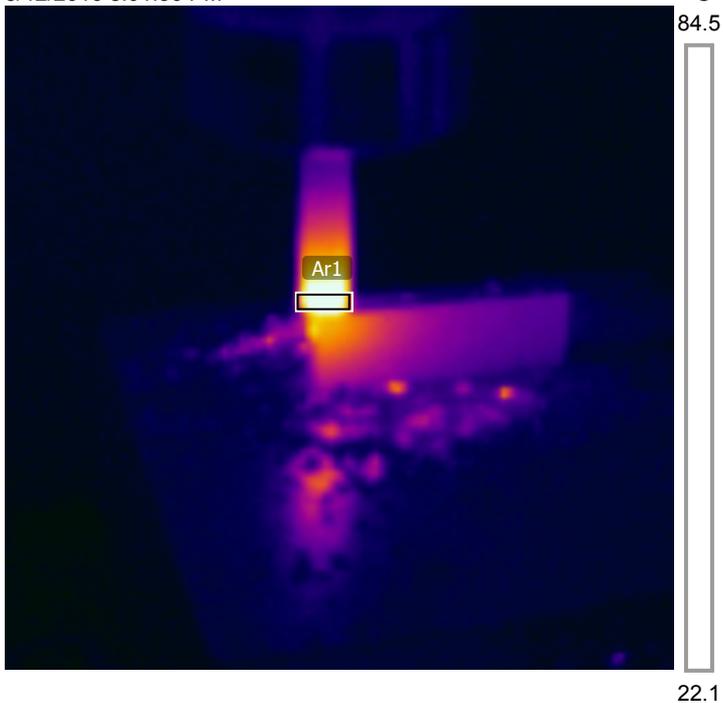
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 13 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,25$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,045$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 8:01:56 PM



IR\_0094.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	92.4
	Min	67.0
	Average	88.3

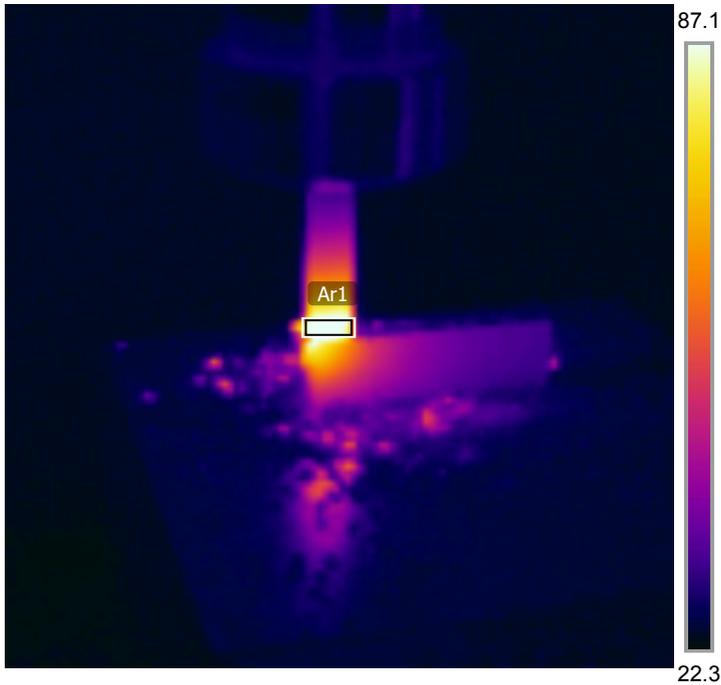
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 14 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,34$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,045$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 8:03:56 PM



IR\_0095.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	93.7
	Min	82.4
	Average	90.5

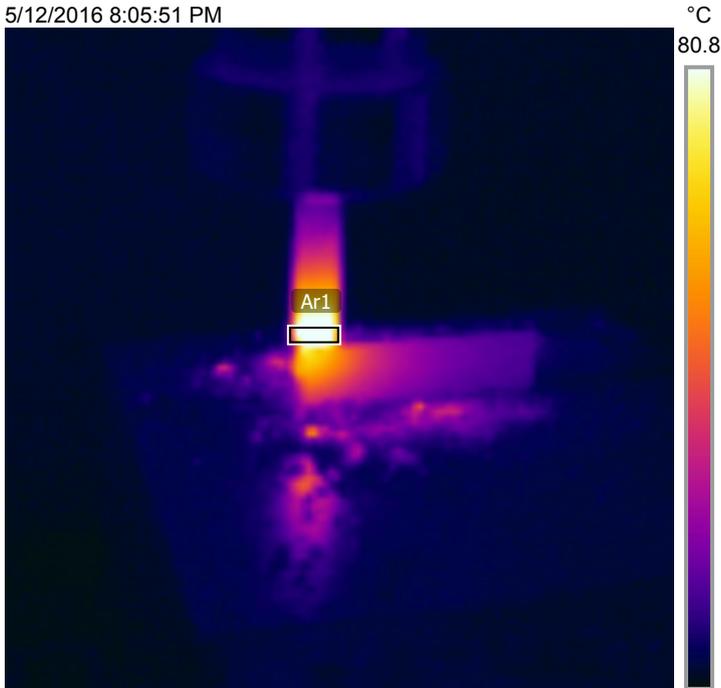
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 15 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,29$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,042$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 8:05:51 PM



IR\_0096.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	90.4
	Min	50.6
	Average	80.9

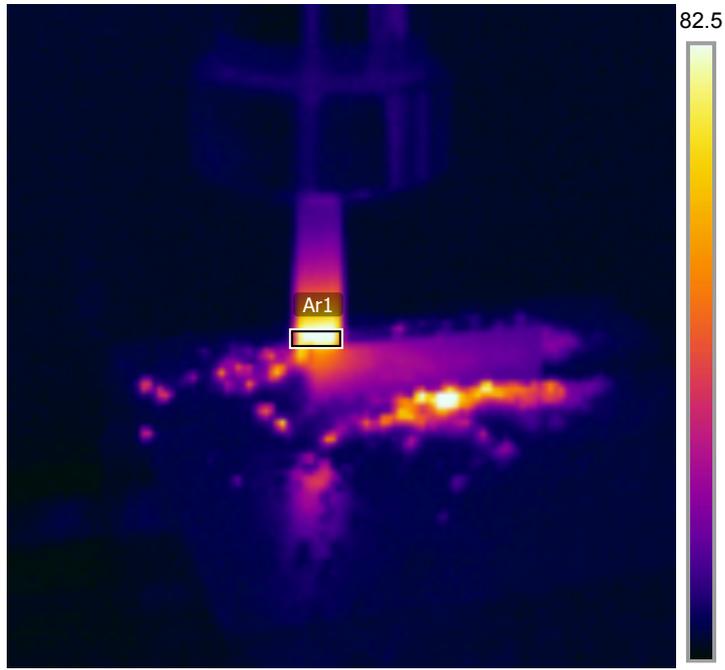
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 16 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,29$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,077$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 8:07:28 PM



IR\_0097.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	85.8
	Min	49.3
	Average	72.3

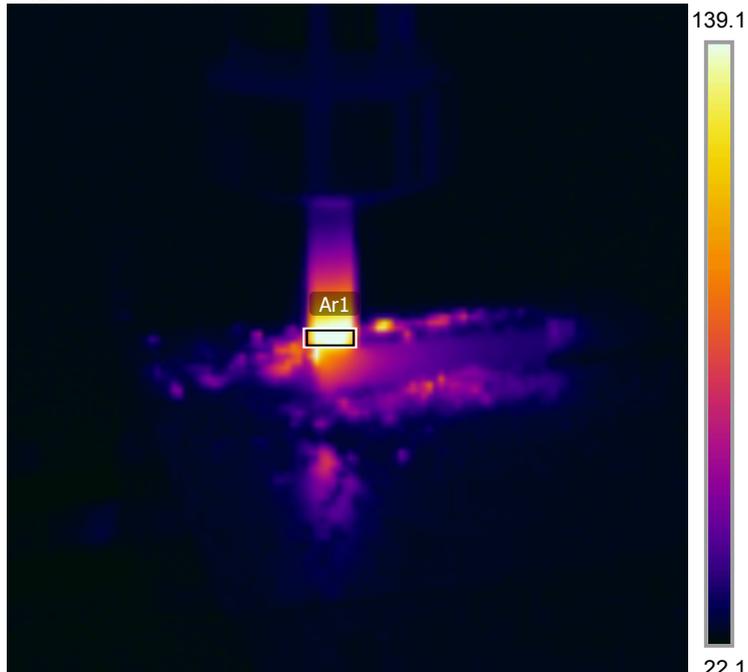
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 17 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,29$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,045$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 0,50$  mm

5/12/2016 8:10:07 PM



IR\_0099.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	149.0
	Min	84.6
	Average	130.6

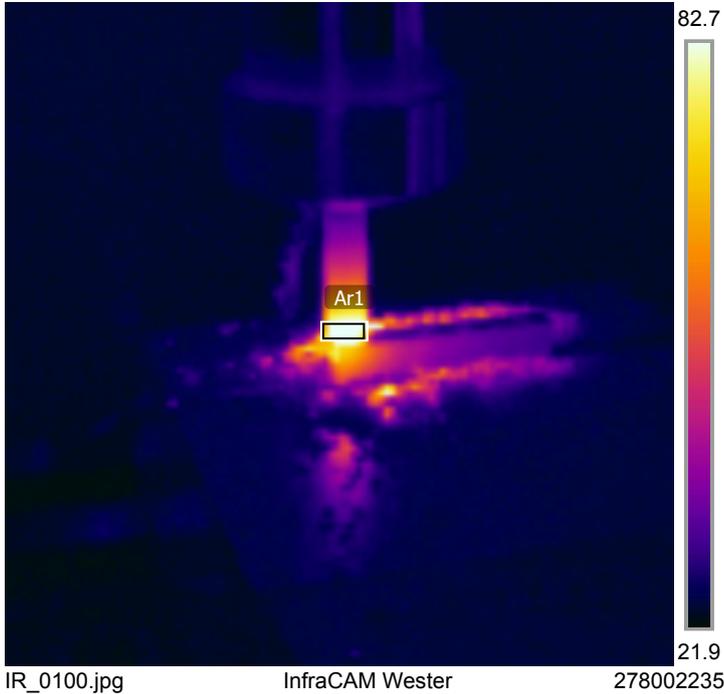
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 18 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,29$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,045$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 2,00$  mm

5/12/2016 8:12:57 PM



### Measurements

		°C
Ar1	Max	103.5
	Min	46.9
	Average	79.1

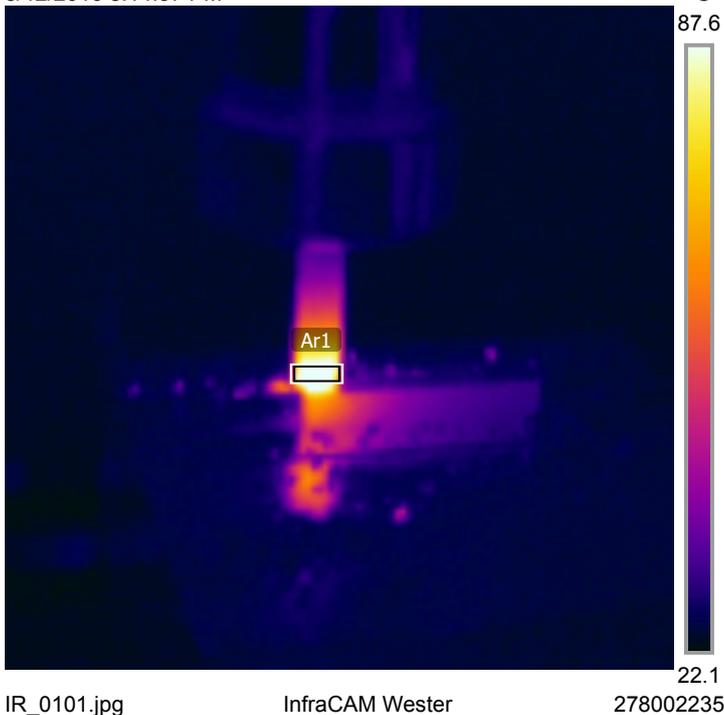
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 19 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,25$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,045$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 8:14:37 PM



### Measurements

		°C
Ar1	Max	95.7
	Min	48.4
	Average	86.5

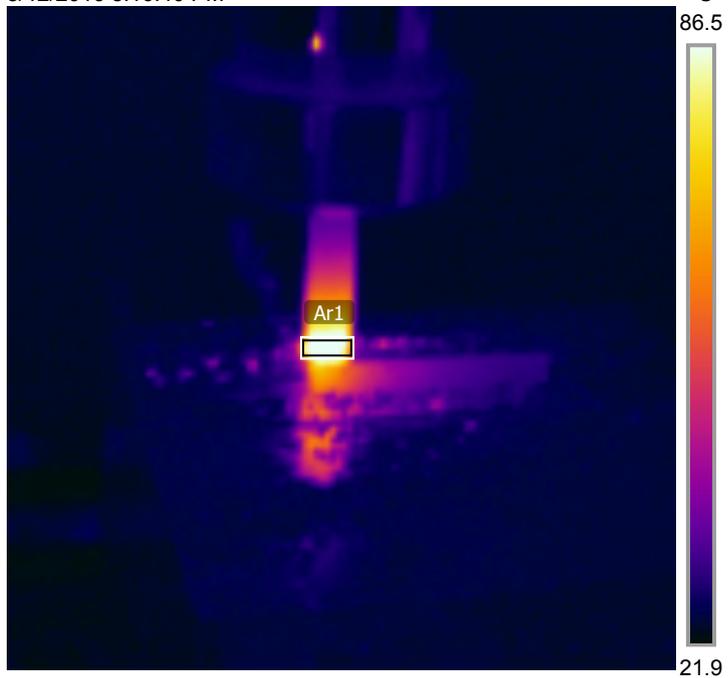
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 20 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,34$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,045$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 8:16:40 PM



IR\_0102.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	94.2
	Min	65.1
	Average	87.8

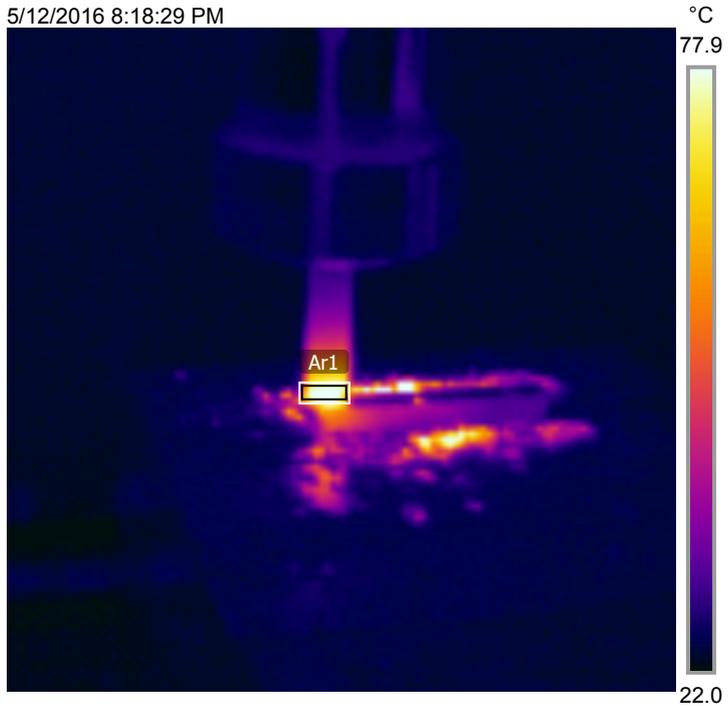
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 21 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,29$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,042$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 8:18:29 PM



IR\_0103.jpg

InfraCAM Wester

278002235

### Measurements

°C

Ar1	Max	80.8
	Min	38.0
	Average	72.7

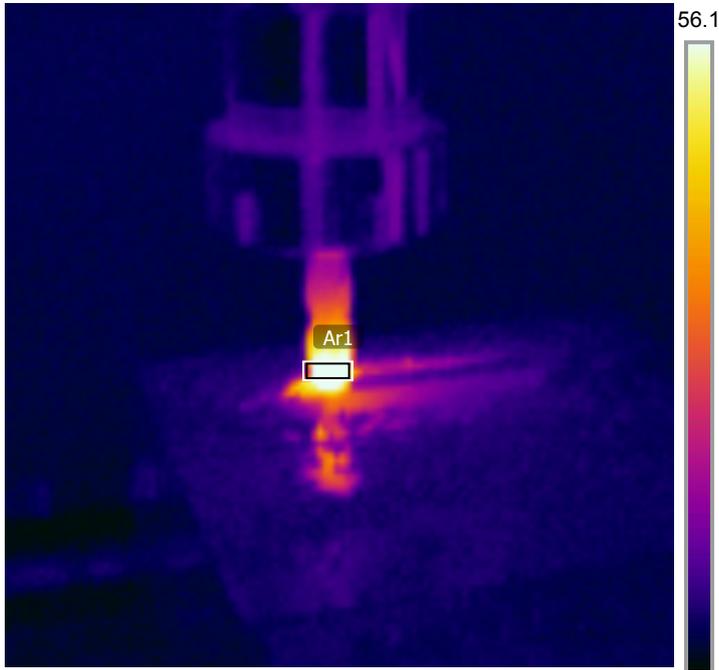
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 22 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,29$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,077$  mm/z Dubina  
rezanja  $a = 1,00$  mm

5/12/2016 8:20:42 PM



IR\_0104.jpg

InfraCAM Wester

22.2  
278002235

### Measurements

		°C
Ar1	Max	61.8
	Min	56.4
	Average	59.7

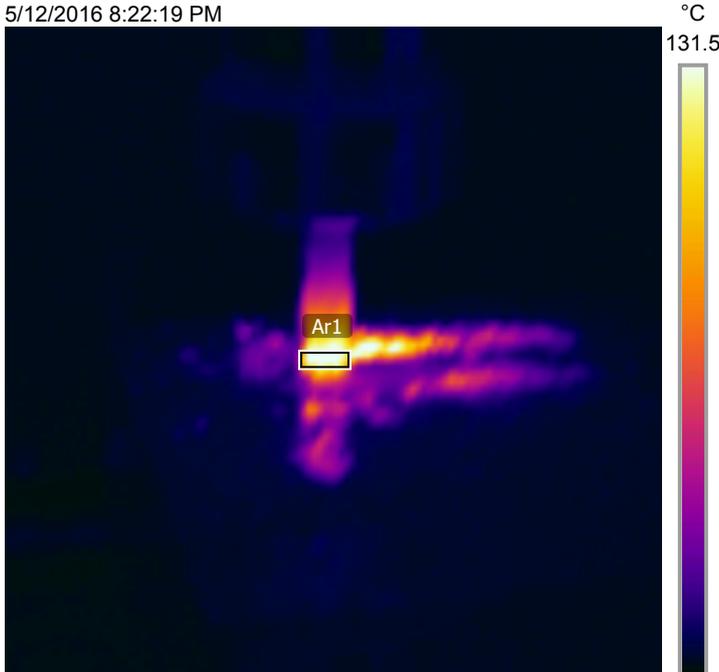
### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 23 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,29$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,045$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 0,50$  mm

5/12/2016 8:22:19 PM



IR\_0105.jpg

InfraCAM Wester

22.1  
278002235

### Measurements

		°C
Ar1	Max	136.5
	Min	101.8
	Average	124.5

### Parameters

Emissivity	0.96
Refl. temp.	20 °C
Distance	0.5 m
Atmospheric temp.	20 °C
Ext. optics temp.	20 °C
Ext. optics trans.	1
Relative humidity	30 %

### Note

Vretenasto glodalo od brzoreznog čelika  
Režim obrade broj 24 (tabela 5.7)  
Brzina rezanja  $v = 0,29$  m/s  
Korak po zubu  $s_z = 0,045$  mm/z  
Dubina rezanja  $a = 2,00$  mm

# PRILOG 2. TROFAKTORNI PLANOVI EKSPERIMENTA

## ODREĐIVANJE ZAVISNOSTI TEMPERATURE U ZONI REZANJA OD REŽIMA OBRADE PRI GLODANJU MODEL BEZ MEDUSOBNIH UTICAJA

Nivo faktora:	$v$ (m/s)	$s_z$ (mm/z)	$a$ (mm)
Nivo (kod)	1.31	0.035	2.00
Gornji (+1.41)	1.23	0.031	1.41
Srednje gornji (+1)	1.15	0.028	1.00
Srednji (0)	1.10	0.025	0.71
Srednje donji (-1)	1.05	0.021	0.50
Donji (-1.41)			

$k$	3
$N$	24
$n_0$	4

Vretenasto glodalo  
TMI  
Materijal alata:  
Prečnik glodala:  
AISI 4340  
Materijal obratka:  
50x30x7 mm  
Dimenzije obratka:

### Plan matrice eksperimenta:

R.br.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$v$ (m/s)	$s_z$ (mm/z)	$a$ (mm)	$\theta$ (°C)	$y$	$x_{1,y}$	$x_{2,y}$	$x_{3,y}$	$y^*$	$(y-y^*)^2$	$\theta_{rel}$ (°C)	$\theta_{min}$ (°C)	$\theta_{max}$ (°C)
1	1	-1	-1	-1	1.10	0.025	0.71	81.0	4.39445	-4.39445	-4.39445	-4.39445	4.58654	0.03690	98.15	88.13	109.32
2	1	-1	-1	-1	1.23	0.025	0.71	104.4	4.64823	4.64823	-4.64823	-4.64823	4.67230	0.00058	106.94	96.02	119.11
3	1	-1	-1	-1	1.10	0.031	0.71	84.9	4.44147	4.44147	4.44147	-4.44147	4.47135	0.00089	87.47	78.54	97.42
4	1	-1	-1	-1	1.23	0.031	0.71	96.8	4.57265	4.57265	4.57265	-4.57265	4.55711	0.00024	95.31	85.58	106.15
5	1	-1	-1	-1	1.10	0.025	1.41	174.5	5.16192	-5.16192	-5.16192	5.16192	5.07562	0.00745	160.07	143.73	178.28
6	1	-1	-1	-1	1.23	0.025	1.41	152.3	5.02585	5.02585	-5.02585	5.02585	5.16138	0.01837	174.40	156.60	194.24
7	1	-1	-1	-1	1.10	0.031	1.41	127.1	4.84497	-4.84497	4.84497	-4.84497	4.96044	0.01333	142.65	128.09	158.88
8	1	-1	-1	-1	1.23	0.031	1.41	142.6	4.96004	4.96004	4.96004	-4.96004	5.04618	0.00742	155.43	139.56	173.10
9	1	0	0	0	1.15	0.028	1.00	127.5	4.84812	0.00000	0.00000	0.00000	4.81636	0.00101	122.01	117.97	129.32
10	1	0	0	0	1.15	0.028	1.00	128.6	4.85671	0.00000	0.00000	0.00000	4.81636	0.00163	122.01	117.97	129.32
11	1	0	0	0	1.15	0.028	1.00	130.2	4.86907	0.00000	0.00000	0.00000	4.81636	0.00278	122.01	117.97	129.32
12	1	0	0	0	1.15	0.028	1.00	132.0	4.88280	0.00000	0.00000	0.00000	4.81636	0.00441	122.01	117.97	129.32
13	1	-1.41	0	0	1.05	0.028	1.00	119.5	4.78332	-6.76463	0.00000	0.00000	4.75572	0.00076	113.78	102.95	131.27
14	1	1.41	0	0	1.31	0.028	1.00	139.8	4.94021	6.98652	0.00000	0.00000	4.87700	0.00400	134.85	116.22	148.19
15	1	0	-1.41	0	1.15	0.021	1.00	137.4	4.92290	-6.96203	0.00000	0.00000	4.89782	0.00063	142.34	118.67	151.31
16	1	0	1.41	0	1.15	0.035	1.00	108.9	4.69043	0.00000	6.63327	0.00000	4.73491	0.00198	108.27	100.83	128.56
17	1	0	0	0	1.15	0.028	0.50	80.8	4.39198	0.00000	0.00000	-6.21119	4.47053	0.00617	74.44	77.40	98.70
18	1	0	0	-1.41	1.15	0.028	2.00	167.5	5.12098	0.00000	0.00000	7.24216	5.16219	0.00170	199.98	154.57	197.10
19	1	-1.41	0	0	1.05	0.028	1.00	137.5	4.92362	-6.96306	0.00000	0.00000	4.75572	0.02819	113.78	102.95	131.27
20	1	1.41	0	0	1.31	0.028	1.00	147.6	4.99451	7.06330	0.00000	0.00000	4.87700	0.01381	134.85	116.22	148.19
21	1	0	-1.41	0	1.15	0.021	1.00	134.5	4.90156	0.00000	-6.93198	0.00000	4.89782	0.00001	142.34	118.67	151.31
22	1	0	1.41	0	1.15	0.035	1.00	118.3	4.77322	0.00000	6.75036	0.00000	4.73491	0.00147	108.27	100.83	128.56
23	1	0	0	-1.41	1.15	0.028	0.50	88.9	4.48751	0.00000	0.00000	-6.34630	4.47053	0.00029	74.44	77.40	98.70
24	1	0	0	1.41	1.15	0.028	2.00	173.5	5.15618	0.00000	0.00000	7.29194	5.16219	0.00004	199.98	154.57	197.10
					115.59271	0.68608	-0.92157	3.91260									

### Faktori b

$b_0$	4.81636
$b_1$	0.04288
$b_2$	-0.05760
$b_3$	0.24454

### Dekodiranje matematičkog modela

$A_1$	17.90446
$A_2$	9.29751
$A_3$	2.91511
$a_1$	-2.70648
$a_2$	33.29739
$a_3$	-0.00160
<b>C</b>	16.1519

### Ocena tačnosti:

$S_{bb}$	556.7365
$S_{b1}$	0.0294
$S_{b2}$	0.0531
$S_{b3}$	0.9568

INV(X**X)	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
$x_0$	2	0	0	0
$x_1$	0	3	0	0
$x_2$	0	0	3	0
$x_3$	0	0	0	3

Faktor	48
--------	----

### Rezidualna suma:

$S_R$	0.15404
$f_R$	14
$S_R^2$	0.01100

### Greška eksperimenta:

$Y_{SR}$	4.86417
$S_{EA}$	0.00068
$S_{EB}$	0.01008
$S_E$	0.01076
$f_E$	5
$S_E^2$	0.00215

### Adekvatnost modela:

$S_a^2$	0.01592
$f_a$	9
$F_a$	7.39653

Fa < Ft = 4.47 model nije adekvatan

t <sub>a,f</sub>	2.145
Ft	4.47
Ft	6.61

za ocenu adekvatnosti  
za ocenu parametara

### Standardna devijacija:

$\sigma^2_1$	0.00252
$\sigma^2_0$	0.00046
$\sigma^2_a$	0.00321

za prvih osam članova eksperimenta  
za drugih četiri člana eksperimenta  
za preostalih dvanaest članova eksperimenta

ODREĐIVANJE ZAVISNOSTI TEMPERATURE U ZONI REZANJA OD REŽIMA OBRABE PRI GLOĐANJU  
 MODEL SA MEDUSOBNIM UTICAJEM

Nivoi faktora:	$v$ (m/s)	$s_r$ (mm/2)	$a$ (mm)
Gornji (+1.41)	1.31	0.035	2.00
Srednje gornji (+1)	1.23	0.031	1.41
Srednji (0)	1.15	0.028	1.00
Srednje donji (-1)	1.1	0.025	0.71
Donji (-1.41)	1.05	0.021	0.50

Vretenasto glodilo  
 TM  
 $\phi$ 10 mm  
 AISI 4340  
 Materijali obratke:  
 Dimenzije obratke:  
 30x30x8 mm

k	3
N	24
$n_p$	4
$K_s$	7

Plan matrice eksperimenta:

R.br.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$	$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$x_{19}$	$x_{20}$	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$	$x_{25}$	$x_{26}$	$x_{27}$	$x_{28}$	$x_{29}$	$x_{30}$	$x_{31}$	$x_{32}$	$x_{33}$	$x_{34}$	$x_{35}$	$x_{36}$	$x_{37}$	$x_{38}$	$x_{39}$	$x_{40}$	$x_{41}$	$x_{42}$	$x_{43}$	$x_{44}$	$x_{45}$	$x_{46}$	$x_{47}$	$x_{48}$	$x_{49}$	$x_{50}$	$x_{51}$	$x_{52}$	$x_{53}$	$x_{54}$	$x_{55}$	$x_{56}$	$x_{57}$	$x_{58}$	$x_{59}$	$x_{60}$	$x_{61}$	$x_{62}$	$x_{63}$	$x_{64}$	$x_{65}$	$x_{66}$	$x_{67}$	$x_{68}$	$x_{69}$	$x_{70}$	$x_{71}$	$x_{72}$	$x_{73}$	$x_{74}$	$x_{75}$	$x_{76}$	$x_{77}$	$x_{78}$	$x_{79}$	$x_{80}$	$x_{81}$	$x_{82}$	$x_{83}$	$x_{84}$	$x_{85}$	$x_{86}$	$x_{87}$	$x_{88}$	$x_{89}$	$x_{90}$	$x_{91}$	$x_{92}$	$x_{93}$	$x_{94}$	$x_{95}$	$x_{96}$	$x_{97}$	$x_{98}$	$x_{99}$	$x_{100}$	$x_{101}$	$x_{102}$	$x_{103}$	$x_{104}$	$x_{105}$	$x_{106}$	$x_{107}$	$x_{108}$	$x_{109}$	$x_{110}$	$x_{111}$	$x_{112}$	$x_{113}$	$x_{114}$	$x_{115}$	$x_{116}$	$x_{117}$	$x_{118}$	$x_{119}$	$x_{120}$	$x_{121}$	$x_{122}$	$x_{123}$	$x_{124}$	$x_{125}$	$x_{126}$	$x_{127}$	$x_{128}$	$x_{129}$	$x_{130}$	$x_{131}$	$x_{132}$	$x_{133}$	$x_{134}$	$x_{135}$	$x_{136}$	$x_{137}$	$x_{138}$	$x_{139}$	$x_{140}$	$x_{141}$	$x_{142}$	$x_{143}$	$x_{144}$	$x_{145}$	$x_{146}$	$x_{147}$	$x_{148}$	$x_{149}$	$x_{150}$	$x_{151}$	$x_{152}$	$x_{153}$	$x_{154}$	$x_{155}$	$x_{156}$	$x_{157}$	$x_{158}$	$x_{159}$	$x_{160}$	$x_{161}$	$x_{162}$	$x_{163}$	$x_{164}$	$x_{165}$	$x_{166}$	$x_{167}$	$x_{168}$	$x_{169}$	$x_{170}$	$x_{171}$	$x_{172}$	$x_{173}$	$x_{174}$	$x_{175}$	$x_{176}$	$x_{177}$	$x_{178}$	$x_{179}$	$x_{180}$	$x_{181}$	$x_{182}$	$x_{183}$	$x_{184}$	$x_{185}$	$x_{186}$	$x_{187}$	$x_{188}$	$x_{189}$	$x_{190}$	$x_{191}$	$x_{192}$	$x_{193}$	$x_{194}$	$x_{195}$	$x_{196}$	$x_{197}$	$x_{198}$	$x_{199}$	$x_{200}$	$x_{201}$	$x_{202}$	$x_{203}$	$x_{204}$	$x_{205}$	$x_{206}$	$x_{207}$	$x_{208}$	$x_{209}$	$x_{210}$	$x_{211}$	$x_{212}$	$x_{213}$	$x_{214}$	$x_{215}$	$x_{216}$	$x_{217}$	$x_{218}$	$x_{219}$	$x_{220}$	$x_{221}$	$x_{222}$	$x_{223}$	$x_{224}$	$x_{225}$	$x_{226}$	$x_{227}$	$x_{228}$	$x_{229}$	$x_{230}$	$x_{231}$	$x_{232}$	$x_{233}$	$x_{234}$	$x_{235}$	$x_{236}$	$x_{237}$	$x_{238}$	$x_{239}$	$x_{240}$	$x_{241}$	$x_{242}$	$x_{243}$	$x_{244}$	$x_{245}$	$x_{246}$	$x_{247}$	$x_{248}$	$x_{249}$	$x_{250}$	$x_{251}$	$x_{252}$	$x_{253}$	$x_{254}$	$x_{255}$	$x_{256}$	$x_{257}$	$x_{258}$	$x_{259}$	$x_{260}$	$x_{261}$	$x_{262}$	$x_{263}$	$x_{264}$	$x_{265}$	$x_{266}$	$x_{267}$	$x_{268}$	$x_{269}$	$x_{270}$	$x_{271}$	$x_{272}$	$x_{273}$	$x_{274}$	$x_{275}$	$x_{276}$	$x_{277}$	$x_{278}$	$x_{279}$	$x_{280}$	$x_{281}$	$x_{282}$	$x_{283}$	$x_{284}$	$x_{285}$	$x_{286}$	$x_{287}$	$x_{288}$	$x_{289}$	$x_{290}$	$x_{291}$	$x_{292}$	$x_{293}$	$x_{294}$	$x_{295}$	$x_{296}$	$x_{297}$	$x_{298}$	$x_{299}$	$x_{300}$	$x_{301}$	$x_{302}$	$x_{303}$	$x_{304}$	$x_{305}$	$x_{306}$	$x_{307}$	$x_{308}$	$x_{309}$	$x_{310}$	$x_{311}$	$x_{312}$	$x_{313}$	$x_{314}$	$x_{315}$	$x_{316}$	$x_{317}$	$x_{318}$	$x_{319}$	$x_{320}$	$x_{321}$	$x_{322}$	$x_{323}$	$x_{324}$	$x_{325}$	$x_{326}$	$x_{327}$	$x_{328}$	$x_{329}$	$x_{330}$	$x_{331}$	$x_{332}$	$x_{333}$	$x_{334}$	$x_{335}$	$x_{336}$	$x_{337}$	$x_{338}$	$x_{339}$	$x_{340}$	$x_{341}$	$x_{342}$	$x_{343}$	$x_{344}$	$x_{345}$	$x_{346}$	$x_{347}$	$x_{348}$	$x_{349}$	$x_{350}$	$x_{351}$	$x_{352}$	$x_{353}$	$x_{354}$	$x_{355}$	$x_{356}$	$x_{357}$	$x_{358}$	$x_{359}$	$x_{360}$	$x_{361}$	$x_{362}$	$x_{363}$	$x_{364}$	$x_{365}$	$x_{366}$	$x_{367}$	$x_{368}$	$x_{369}$	$x_{370}$	$x_{371}$	$x_{372}$	$x_{373}$	$x_{374}$	$x_{375}$	$x_{376}$	$x_{377}$	$x_{378}$	$x_{379}$	$x_{380}$	$x_{381}$	$x_{382}$	$x_{383}$	$x_{384}$	$x_{385}$	$x_{386}$	$x_{387}$	$x_{388}$	$x_{389}$	$x_{390}$	$x_{391}$	$x_{392}$	$x_{393}$	$x_{394}$	$x_{395}$	$x_{396}$	$x_{397}$	$x_{398}$	$x_{399}$	$x_{400}$	$x_{401}$	$x_{402}$	$x_{403}$	$x_{404}$	$x_{405}$	$x_{406}$	$x_{407}$	$x_{408}$	$x_{409}$	$x_{410}$	$x_{411}$	$x_{412}$	$x_{413}$	$x_{414}$	$x_{415}$	$x_{416}$	$x_{417}$	$x_{418}$	$x_{419}$	$x_{420}$	$x_{421}$	$x_{422}$	$x_{423}$	$x_{424}$	$x_{425}$	$x_{426}$	$x_{427}$	$x_{428}$	$x_{429}$	$x_{430}$	$x_{431}$	$x_{432}$	$x_{433}$	$x_{434}$	$x_{435}$	$x_{436}$	$x_{437}$	$x_{438}$	$x_{439}$	$x_{440}$	$x_{441}$	$x_{442}$	$x_{443}$	$x_{444}$	$x_{445}$	$x_{446}$	$x_{447}$	$x_{448}$	$x_{449}$	$x_{450}$	$x_{451}$	$x_{452}$	$x_{453}$	$x_{454}$	$x_{455}$	$x_{456}$	$x_{457}$	$x_{458}$	$x_{459}$	$x_{460}$	$x_{461}$	$x_{462}$	$x_{463}$	$x_{464}$	$x_{465}$	$x_{466}$	$x_{467}$	$x_{468}$	$x_{469}$	$x_{470}$	$x_{471}$	$x_{472}$	$x_{473}$	$x_{474}$	$x_{475}$	$x_{476}$	$x_{477}$	$x_{478}$	$x_{479}$	$x_{480}$	$x_{481}$	$x_{482}$	$x_{483}$	$x_{484}$	$x_{485}$	$x_{486}$	$x_{487}$	$x_{488}$	$x_{489}$	$x_{490}$	$x_{491}$	$x_{492}$	$x_{493}$	$x_{494}$	$x_{495}$	$x_{496}$	$x_{497}$	$x_{498}$	$x_{499}$	$x_{500}$	$x_{501}$	$x_{502}$	$x_{503}$	$x_{504}$	$x_{505}$	$x_{506}$	$x_{507}$	$x_{508}$	$x_{509}$	$x_{510}$	$x_{511}$	$x_{512}$	$x_{513}$	$x_{514}$	$x_{515}$	$x_{516}$	$x_{517}$	$x_{518}$	$x_{519}$	$x_{520}$	$x_{521}$	$x_{522}$	$x_{523}$	$x_{524}$	$x_{525}$	$x_{526}$	$x_{527}$	$x_{528}$	$x_{529}$	$x_{530}$	$x_{531}$	$x_{532}$	$x_{533}$	$x_{534}$	$x_{535}$	$x_{536}$	$x_{537}$	$x_{538}$	$x_{539}$	$x_{540}$	$x_{541}$	$x_{542}$	$x_{543}$	$x_{544}$	$x_{545}$	$x_{546}$	$x_{547}$	$x_{548}$	$x_{549}$	$x_{550}$	$x_{551}$	$x_{552}$	$x_{553}$	$x_{554}$	$x_{555}$	$x_{556}$	$x_{557}$	$x_{558}$	$x_{559}$	$x_{560}$	$x_{561}$	$x_{562}$	$x_{563}$	$x_{564}$	$x_{565}$	$x_{566}$	$x_{567}$	$x_{568}$	$x_{569}$	$x_{570}$	$x_{571}$	$x_{572}$	$x_{573}$	$x_{574}$	$x_{575}$	$x_{576}$	$x_{577}$	$x_{578}$	$x_{579}$	$x_{580}$	$x_{581}$	$x_{582}$	$x_{583}$	$x_{584}$	$x_{585}$	$x_{586}$	$x_{587}$	$x_{588}$	$x_{589}$	$x_{590}$	$x_{591}$	$x_{592}$	$x_{593}$	$x_{594}$	$x_{595}$	$x_{596}$	$x_{597}$	$x_{598}$	$x_{599}$	$x_{600}$	$x_{601}$	$x_{602}$	$x_{603}$	$x_{604}$	$x_{605}$	$x_{606}$	$x_{607}$	$x_{608}$	$x_{609}$	$x_{610}$	$x_{611}$	$x_{612}$	$x_{613}$	$x_{614}$	$x_{615}$	$x_{616}$	$x_{617}$	$x_{618}$	$x_{619}$	$x_{620}$	$x_{621}$	$x_{622}$	$x_{623}$	$x_{624}$	$x_{625}$	$x_{626}$	$x_{627}$	$x_{628}$	$x_{629}$	$x_{630}$	$x_{631}$	$x_{632}$	$x_{633}$	$x_{634}$	$x_{635}$	$x_{636}$	$x_{637}$	$x_{638}$	$x_{639}$	$x_{640}$	$x_{641}$	$x_{642}$	$x_{643}$	$x_{644}$	$x_{645}$	$x_{646}$	$x_{647}$	$x_{648}$	$x_{649}$	$x_{650}$	$x_{651}$	$x_{652}$	$x_{653}$	$x_{654}$	$x_{655}$	$x_{656}$	$x_{657}$	$x_{658}$	$x_{659}$	$x_{660}$	$x_{661}$	$x_{662}$	$x_{663}$	$x_{664}$	$x_{665}$	$x_{666}$	$x_{667}$	$x_{668}$	$x_{669}$	$x_{670}$	$x_{671}$	$x_{672}$	$x_{673}$	$x_{674}$	$x_{675}$	$x_{676}$	$x_{677}$	$x_{678}$	$x_{679}$	$x_{680}$	$x_{681}$	$x_{682}$	$x_{683}$	$x_{684}$	$x_{685}$	$x_{686}$	$x_{687}$	$x_{688}$	$x_{689}$	$x_{690}$	$x_{691}$	$x_{692}$	$x_{693}$	$x_{694}$	$x_{695}$	$x_{696}$	$x_{697}$	$x_{698}$	$x_{699}$	$x_{700}$	$x_{701}$	$x_{702}$	$x_{703}$	$x_{704}$	$x_{705}$	$x_{706}$	$x_{707}$	$x_{708}$	$x_{709}$	$x_{710}$	$x_{711}$	$x_{712}$	$x_{713}$	$x_{714}$	$x_{715}$	$x_{716}$	$x_{717}$	$x_{718}$	$x_{719}$	$x_{720}$	$x_{721}$	$x_{722}$	$x_{723}$	$x_{724}$	$x_{725}$	$x_{726}$	$x_{727}$	$x_{728}$	$x_{729}$	$x_{730}$	$x_{731}$	$x_{732}$	$x_{733}$	$x_{734}$	$x_{735}$	$x_{736}$	$x_{737}$	$x_{738}$	$x_{739}$	$x_{740}$	$x_{741}$	$x_{742}$	$x_{743}$	$x_{744}$	$x_{745}$	$x_{746}$	$x_{747}$	$x_{748}$	$x_{749}$	$x_{750}$	$x_{751}$	$x_{752}$	$x_{753}$	$x_{754}$	$x_{755}$	$x_{756}$	$x_{757}$	$x_{758}$	$x_{759}$	$x_{760}$	$x_{761}$	$x_{762}$	$x_{763}$	$x_{764}$	$x_{765}$	$x_{766}$	$x_{767}$	$x_{768}$	$x_{769}$	$x_{770}$	$x_{771}$	$x_{772}$	$x_{773}$	$x_{774}$	$x_{775}$	$x_{776}$	$x_{777}$	$x_{778}$	$x_{779}$	$x_{780}$	$x_{781}$	$x_{782}$	$x_{783}$	$x_{784}$	$x_{785}$	$x_{786}$	$x_{787}$	$x_{788}$	$x_{789}$	$x_{790}$	$x_{791}$	$x_{792}$	$x_{793}$	$x_{794}$	$x_{795}$	$x_{796}$	$x_{797}$	$x_{798}$	$x_{799}$	$x_{800}$	$x_{801}$	$x_{802}$	$x_{803}$	$x_{804}$	$x_{805}$	$x_{806}$	$x_{807}$	$x_{808}$	$x_{809}$	$x_{810}$	$x_{811}$	$x_{812}$	$x_{813}$	$x_{814}$	$x_{815}$	$x_{816}$	$x_{817}$	$x_{818}$	$x_{819}$	$x_{820}$	$x_{821}$	$x_{822}$	$x_{823}$	$x_{824}$	$x_{825}$	$x_{826}$	$x_{827}$	$x_{828}$	$x_{829}$	$x_{830}$	$x_{831}$	$x_{832}$	$x_{833}$	$x_{834}$	$x_{835}$
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

**ODREĐIVANJE ZAVISNOSTI TEMPERATURE U ZONI REZANJA OD REŽIMA OBRADE PRI GLODANJU**  
 MODEL BEZ MEDUSOBNIH UTICAJA

Nivoi faktora:

Nivo (kod)	v (m/s)	s <sub>z</sub> (mm/z)	a (mm)
Gornji (+1.41)	0.34	0.077	2.00
Srednje gornji (+1)	0.31	0.063	1.41
Srednji (0)	0.29	0.045	1.00
Srednje donji (-1)	0.27	0.044	0.71
Donji (-1.41)	0.25	0.042	0.50

k	3
N	24
n <sub>0</sub>	4

Alat:  
 Vretenasto glodalo  
 HSS  
 Prečnik glodala:  
 φ10 mm  
 Materijal obratka:  
 AISI 4340  
 Dimenzije obratka:  
 50x30x7 mm

Plan matrice eksperimenta:

R.br.	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	v (m/s)	s <sub>z</sub> (mm/z)	a (mm)	θ (°C)	γ	x <sub>1,y</sub>	x <sub>2,y</sub>	x <sub>3,y</sub>	γ <sup>2</sup>	θ <sub>rek.</sub> (°C)	θ <sub>min.</sub> (°C)	θ <sub>max.</sub> (°C)
1	1	-1	-1	-1	0.27	0.044	0.71	64.9	4.17285	-4.17285	-4.17285	-4.17285	0.00020	65.82	60.45	71.68
2	1	-1	-1	-1	0.31	0.044	0.71	66.9	4.20320	-4.20320	-4.20320	-4.20320	0.00702	72.75	66.81	79.22
3	1	-1	-1	-1	0.27	0.063	0.71	58.0	4.06044	-4.06044	-4.06044	-4.06044	0.00096	59.63	54.94	65.15
4	1	-1	-1	-1	0.31	0.063	0.71	70.6	4.25703	-4.25703	-4.25703	-4.25703	0.00429	66.12	60.72	72.00
5	1	-1	-1	-1	0.27	0.044	1.41	100.6	4.61115	-4.61115	-4.61115	-4.61115	0.00171	104.85	96.29	114.18
6	1	-1	-1	-1	0.31	0.044	1.41	121.5	4.79991	-4.79991	-4.79991	-4.79991	0.00224	115.88	106.42	126.19
7	1	-1	-1	-1	0.27	0.063	1.41	90.6	4.50645	-4.50645	-4.50645	-4.50645	0.00256	95.30	87.52	103.78
8	1	-1	-1	-1	0.31	0.063	1.41	102.0	4.62497	-4.62497	-4.62497	-4.62497	0.00304	105.33	96.73	114.70
9	1	0	0	0	0.29	0.045	1.00	78.8	4.36691	0.00000	0.00000	0.00000	0.00304	86.93	80.29	86.35
10	1	0	0	0	0.29	0.045	1.00	79.1	4.37071	0.00000	0.00000	0.00000	0.00263	86.93	80.29	86.35
11	1	0	0	0	0.29	0.045	1.00	77.9	4.35543	0.00000	0.00000	0.00000	0.00444	86.93	80.29	86.35
12	1	0	0	0	0.29	0.045	1.00	79.8	4.37952	0.00000	0.00000	0.00000	0.00181	86.93	80.29	86.35
13	1	-1.41	0	0	0.25	0.045	1.00	80.0	4.38203	-6.19712	0.00000	0.00000	0.00094	78.07	70.47	85.41
14	1	1.41	0	0	0.34	0.045	1.00	88.3	4.48074	6.33672	0.00000	0.00000	0.00014	97.55	81.78	98.39
15	1	0	-1.41	0	0.29	0.042	1.00	90.5	4.50535	-6.37153	0.00000	0.00000	0.00025	88.54	80.92	98.07
16	1	0	1.41	0	0.29	0.077	1.00	80.9	4.39321	0.00000	6.21294	0.00000	0.00150	75.36	70.70	85.68
17	1	0	0	0	0.29	0.045	0.50	72.3	4.28082	0.00000	0.00000	-6.05400	0.03555	54.31	54.42	65.95
18	1	0	0	-1.41	0.29	0.045	2.00	130.6	4.87214	0.00000	0.00000	6.89025	0.01462	139.14	105.12	127.40
19	1	-1.41	0	0	0.25	0.045	1.00	79.1	4.37071	-6.18112	0.00000	0.00000	0.00038	78.07	70.47	85.41
20	1	1.41	0	0	0.34	0.045	1.00	86.5	4.46014	6.30760	0.00000	0.00000	0.00106	97.55	81.78	98.39
21	1	0	-1.41	0	0.29	0.042	1.00	87.8	4.47506	0.00000	-6.32869	0.00000	0.00021	88.54	80.92	98.07
22	1	0	1.41	0	0.29	0.077	1.00	72.7	4.28634	0.00000	6.06180	0.00000	0.00465	75.36	70.70	85.68
23	1	0	0	-1.41	0.29	0.045	0.50	59.7	4.08933	0.00000	0.00000	-5.78319	0.00001	54.31	54.42	65.95
24	1	0	0	1.41	0.29	0.045	2.00	124.5	4.82431	0.00000	0.00000	6.82260	0.00534	139.14	105.12	127.40
									106.12878	0.80030	-0.76369	3.72463				

Faktori b

b <sub>0</sub>	4.42203
b <sub>1</sub>	0.05002
b <sub>2</sub>	-0.04773
b <sub>3</sub>	0.23279

Dekodiranje matematičkog modela

A <sub>1</sub>	14.47698
A <sub>2</sub>	5.57188
A <sub>3</sub>	2.91511
a <sub>1</sub>	17.95520
a <sub>2</sub>	16.40414
a <sub>3</sub>	-0.00160

Ocena tačnosti:

S <sub>bb</sub>	469.3049
S <sub>b1</sub>	0.0400
S <sub>b2</sub>	0.0365
S <sub>b3</sub>	0.8671

INV(X**X)	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>
X <sub>0</sub>	2	0	0	0
X <sub>1</sub>	0	3	0	0
X <sub>2</sub>	0	0	3	0
X <sub>3</sub>	0	0	0	3

Faktor 48

Rezidualna suma:

S <sub>R</sub>	0.09639
f <sub>R</sub>	14
S <sub>R</sub> <sup>2</sup>	0.00888

Greška eksperimenta:

Y <sub>SR</sub>	4.36814
S <sub>EA</sub>	0.00030
S <sub>EB</sub>	0.01296
S <sub>E</sub>	0.01326
f <sub>E</sub>	5
S <sub>E</sub> <sup>2</sup>	0.00265

Adekvatnost modela:

S <sub>a</sub> <sup>2</sup>	0.00924
f <sub>a</sub>	9
F <sub>a</sub>	3.48229

F<sub>a</sub><F<sub>t</sub>=4.47 model je adekvatan

t <sub>a,f</sub>	2.145
F <sub>t</sub>	4.47
F <sub>t</sub>	6.61

za ocenu adekvatnosti  
 za ocenu parametara

Standardna devijacija:

σ <sup>2</sup> <sub>1</sub>	0.00158
σ <sup>2</sup> <sub>0</sub>	0.00029
σ <sup>2</sup> <sub>a</sub>	0.00201

za prvih osam članova eksperimenta  
 za drugih četiri člana eksperimenta  
 za preostalih dvanaest članova eksperimenta

ODREĐIVANJE ZAVISNOSTI TEMPERATURE U ZONI REZANJA OD REŽIMA OBRADE PRI GLODANJU  
 MODEL SA NEBUDUĆIM UTICAJEM

Nivoi faktora:	V (m/s)	s <sub>z</sub> (mm/z)	a (mm)
Gornji (+1,41)	0.34	0.077	2.00
Srednji (0)	0.31	0.063	1.41
Dolji (-1)	0.29	0.045	1.00
Srednji obrniti (-1)	0.27	0.048	0.71
Gornji (-1,41)	0.25	0.042	0.50

k	3
N	24
n <sub>p</sub>	4
K <sub>s</sub>	7

Alat: Vretenasto glodalo  
 Materijal alata: HSS  
 Prsčnik glodalca: φ 10 mm  
 Materijal obratka: AISI 4340  
 Dimenzije obratka: 30x30x7 mm

Plan matrice eksperimenta:

R.br.	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>	x <sub>7</sub>	x <sub>8</sub>	x <sub>9</sub>	x <sub>10</sub>	x <sub>11</sub>	x <sub>12</sub>	x <sub>13</sub>	x <sub>14</sub>	x <sub>15</sub>	x <sub>16</sub>	x <sub>17</sub>	x <sub>18</sub>	x <sub>19</sub>	x <sub>20</sub>	x <sub>21</sub>	x <sub>22</sub>	x <sub>23</sub>	x <sub>24</sub>	x <sub>25</sub>	x <sub>26</sub>	x <sub>27</sub>	x <sub>28</sub>	x <sub>29</sub>	x <sub>30</sub>	x <sub>31</sub>	x <sub>32</sub>	x <sub>33</sub>	x <sub>34</sub>	x <sub>35</sub>	x <sub>36</sub>	x <sub>37</sub>	x <sub>38</sub>	x <sub>39</sub>	x <sub>40</sub>	x <sub>41</sub>	x <sub>42</sub>	x <sub>43</sub>	x <sub>44</sub>	x <sub>45</sub>	x <sub>46</sub>	x <sub>47</sub>	x <sub>48</sub>	x <sub>49</sub>	x <sub>50</sub>	x <sub>51</sub>	x <sub>52</sub>	x <sub>53</sub>	x <sub>54</sub>	x <sub>55</sub>	x <sub>56</sub>	x <sub>57</sub>	x <sub>58</sub>	x <sub>59</sub>	x <sub>60</sub>	x <sub>61</sub>	x <sub>62</sub>	x <sub>63</sub>	x <sub>64</sub>	x <sub>65</sub>	x <sub>66</sub>	x <sub>67</sub>	x <sub>68</sub>	x <sub>69</sub>	x <sub>70</sub>	x <sub>71</sub>	x <sub>72</sub>	x <sub>73</sub>	x <sub>74</sub>	x <sub>75</sub>	x <sub>76</sub>	x <sub>77</sub>	x <sub>78</sub>	x <sub>79</sub>	x <sub>80</sub>	x <sub>81</sub>	x <sub>82</sub>	x <sub>83</sub>	x <sub>84</sub>	x <sub>85</sub>	x <sub>86</sub>	x <sub>87</sub>	x <sub>88</sub>	x <sub>89</sub>	x <sub>90</sub>	x <sub>91</sub>	x <sub>92</sub>	x <sub>93</sub>	x <sub>94</sub>	x <sub>95</sub>	x <sub>96</sub>	x <sub>97</sub>	x <sub>98</sub>	x <sub>99</sub>	x <sub>100</sub>	x <sub>101</sub>	x <sub>102</sub>	x <sub>103</sub>	x <sub>104</sub>	x <sub>105</sub>	x <sub>106</sub>	x <sub>107</sub>	x <sub>108</sub>	x <sub>109</sub>	x <sub>110</sub>	x <sub>111</sub>	x <sub>112</sub>	x <sub>113</sub>	x <sub>114</sub>	x <sub>115</sub>	x <sub>116</sub>	x <sub>117</sub>	x <sub>118</sub>	x <sub>119</sub>	x <sub>120</sub>	x <sub>121</sub>	x <sub>122</sub>	x <sub>123</sub>	x <sub>124</sub>	x <sub>125</sub>	x <sub>126</sub>	x <sub>127</sub>	x <sub>128</sub>	x <sub>129</sub>	x <sub>130</sub>	x <sub>131</sub>	x <sub>132</sub>	x <sub>133</sub>	x <sub>134</sub>	x <sub>135</sub>	x <sub>136</sub>	x <sub>137</sub>	x <sub>138</sub>	x <sub>139</sub>	x <sub>140</sub>	x <sub>141</sub>	x <sub>142</sub>	x <sub>143</sub>	x <sub>144</sub>	x <sub>145</sub>	x <sub>146</sub>	x <sub>147</sub>	x <sub>148</sub>	x <sub>149</sub>	x <sub>150</sub>	x <sub>151</sub>	x <sub>152</sub>	x <sub>153</sub>	x <sub>154</sub>	x <sub>155</sub>	x <sub>156</sub>	x <sub>157</sub>	x <sub>158</sub>	x <sub>159</sub>	x <sub>160</sub>	x <sub>161</sub>	x <sub>162</sub>	x <sub>163</sub>	x <sub>164</sub>	x <sub>165</sub>	x <sub>166</sub>	x <sub>167</sub>	x <sub>168</sub>	x <sub>169</sub>	x <sub>170</sub>	x <sub>171</sub>	x <sub>172</sub>	x <sub>173</sub>	x <sub>174</sub>	x <sub>175</sub>	x <sub>176</sub>	x <sub>177</sub>	x <sub>178</sub>	x <sub>179</sub>	x <sub>180</sub>	x <sub>181</sub>	x <sub>182</sub>	x <sub>183</sub>	x <sub>184</sub>	x <sub>185</sub>	x <sub>186</sub>	x <sub>187</sub>	x <sub>188</sub>	x <sub>189</sub>	x <sub>190</sub>	x <sub>191</sub>	x <sub>192</sub>	x <sub>193</sub>	x <sub>194</sub>	x <sub>195</sub>	x <sub>196</sub>	x <sub>197</sub>	x <sub>198</sub>	x <sub>199</sub>	x <sub>200</sub>	x <sub>201</sub>	x <sub>202</sub>	x <sub>203</sub>	x <sub>204</sub>	x <sub>205</sub>	x <sub>206</sub>	x <sub>207</sub>	x <sub>208</sub>	x <sub>209</sub>	x <sub>210</sub>	x <sub>211</sub>	x <sub>212</sub>	x <sub>213</sub>	x <sub>214</sub>	x <sub>215</sub>	x <sub>216</sub>	x <sub>217</sub>	x <sub>218</sub>	x <sub>219</sub>	x <sub>220</sub>	x <sub>221</sub>	x <sub>222</sub>	x <sub>223</sub>	x <sub>224</sub>	x <sub>225</sub>	x <sub>226</sub>	x <sub>227</sub>	x <sub>228</sub>	x <sub>229</sub>	x <sub>230</sub>	x <sub>231</sub>	x <sub>232</sub>	x <sub>233</sub>	x <sub>234</sub>	x <sub>235</sub>	x <sub>236</sub>	x <sub>237</sub>	x <sub>238</sub>	x <sub>239</sub>	x <sub>240</sub>	x <sub>241</sub>	x <sub>242</sub>	x <sub>243</sub>	x <sub>244</sub>	x <sub>245</sub>	x <sub>246</sub>	x <sub>247</sub>	x <sub>248</sub>	x <sub>249</sub>	x <sub>250</sub>	x <sub>251</sub>	x <sub>252</sub>	x <sub>253</sub>	x <sub>254</sub>	x <sub>255</sub>	x <sub>256</sub>	x <sub>257</sub>	x <sub>258</sub>	x <sub>259</sub>	x <sub>260</sub>	x <sub>261</sub>	x <sub>262</sub>	x <sub>263</sub>	x <sub>264</sub>	x <sub>265</sub>	x <sub>266</sub>	x <sub>267</sub>	x <sub>268</sub>	x <sub>269</sub>	x <sub>270</sub>	x <sub>271</sub>	x <sub>272</sub>	x <sub>273</sub>	x <sub>274</sub>	x <sub>275</sub>	x <sub>276</sub>	x <sub>277</sub>	x <sub>278</sub>	x <sub>279</sub>	x <sub>280</sub>	x <sub>281</sub>	x <sub>282</sub>	x <sub>283</sub>	x <sub>284</sub>	x <sub>285</sub>	x <sub>286</sub>	x <sub>287</sub>	x <sub>288</sub>	x <sub>289</sub>	x <sub>290</sub>	x <sub>291</sub>	x <sub>292</sub>	x <sub>293</sub>	x <sub>294</sub>	x <sub>295</sub>	x <sub>296</sub>	x <sub>297</sub>	x <sub>298</sub>	x <sub>299</sub>	x <sub>300</sub>	x <sub>301</sub>	x <sub>302</sub>	x <sub>303</sub>	x <sub>304</sub>	x <sub>305</sub>	x <sub>306</sub>	x <sub>307</sub>	x <sub>308</sub>	x <sub>309</sub>	x <sub>310</sub>	x <sub>311</sub>	x <sub>312</sub>	x <sub>313</sub>	x <sub>314</sub>	x <sub>315</sub>	x <sub>316</sub>	x <sub>317</sub>	x <sub>318</sub>	x <sub>319</sub>	x <sub>320</sub>	x <sub>321</sub>	x <sub>322</sub>	x <sub>323</sub>	x <sub>324</sub>	x <sub>325</sub>	x <sub>326</sub>	x <sub>327</sub>	x <sub>328</sub>	x <sub>329</sub>	x <sub>330</sub>	x <sub>331</sub>	x <sub>332</sub>	x <sub>333</sub>	x <sub>334</sub>	x <sub>335</sub>	x <sub>336</sub>	x <sub>337</sub>	x <sub>338</sub>	x <sub>339</sub>	x <sub>340</sub>	x <sub>341</sub>	x <sub>342</sub>	x <sub>343</sub>	x <sub>344</sub>	x <sub>345</sub>	x <sub>346</sub>	x <sub>347</sub>	x <sub>348</sub>	x <sub>349</sub>	x <sub>350</sub>	x <sub>351</sub>	x <sub>352</sub>	x <sub>353</sub>	x <sub>354</sub>	x <sub>355</sub>	x <sub>356</sub>	x <sub>357</sub>	x <sub>358</sub>	x <sub>359</sub>	x <sub>360</sub>	x <sub>361</sub>	x <sub>362</sub>	x <sub>363</sub>	x <sub>364</sub>	x <sub>365</sub>	x <sub>366</sub>	x <sub>367</sub>	x <sub>368</sub>	x <sub>369</sub>	x <sub>370</sub>	x <sub>371</sub>	x <sub>372</sub>	x <sub>373</sub>	x <sub>374</sub>	x <sub>375</sub>	x <sub>376</sub>	x <sub>377</sub>	x <sub>378</sub>	x <sub>379</sub>	x <sub>380</sub>	x <sub>381</sub>	x <sub>382</sub>	x <sub>383</sub>	x <sub>384</sub>	x <sub>385</sub>	x <sub>386</sub>	x <sub>387</sub>	x <sub>388</sub>	x <sub>389</sub>	x <sub>390</sub>	x <sub>391</sub>	x <sub>392</sub>	x <sub>393</sub>	x <sub>394</sub>	x <sub>395</sub>	x <sub>396</sub>	x <sub>397</sub>	x <sub>398</sub>	x <sub>399</sub>	x <sub>400</sub>	x <sub>401</sub>	x <sub>402</sub>	x <sub>403</sub>	x <sub>404</sub>	x <sub>405</sub>	x <sub>406</sub>	x <sub>407</sub>	x <sub>408</sub>	x <sub>409</sub>	x <sub>410</sub>	x <sub>411</sub>	x <sub>412</sub>	x <sub>413</sub>	x <sub>414</sub>	x <sub>415</sub>	x <sub>416</sub>	x <sub>417</sub>	x <sub>418</sub>	x <sub>419</sub>	x <sub>420</sub>	x <sub>421</sub>	x <sub>422</sub>	x <sub>423</sub>	x <sub>424</sub>	x <sub>425</sub>	x <sub>426</sub>	x <sub>427</sub>	x <sub>428</sub>	x <sub>429</sub>	x <sub>430</sub>	x <sub>431</sub>	x <sub>432</sub>	x <sub>433</sub>	x <sub>434</sub>	x <sub>435</sub>	x <sub>436</sub>	x <sub>437</sub>	x <sub>438</sub>	x <sub>439</sub>	x <sub>440</sub>	x <sub>441</sub>	x <sub>442</sub>	x <sub>443</sub>	x <sub>444</sub>	x <sub>445</sub>	x <sub>446</sub>	x <sub>447</sub>	x <sub>448</sub>	x <sub>449</sub>	x <sub>450</sub>	x <sub>451</sub>	x <sub>452</sub>	x <sub>453</sub>	x <sub>454</sub>	x <sub>455</sub>	x <sub>456</sub>	x <sub>457</sub>	x <sub>458</sub>	x <sub>459</sub>	x <sub>460</sub>	x <sub>461</sub>	x <sub>462</sub>	x <sub>463</sub>	x <sub>464</sub>	x <sub>465</sub>	x <sub>466</sub>	x <sub>467</sub>	x <sub>468</sub>	x <sub>469</sub>	x <sub>470</sub>	x <sub>471</sub>	x <sub>472</sub>	x <sub>473</sub>	x <sub>474</sub>	x <sub>475</sub>	x <sub>476</sub>	x <sub>477</sub>	x <sub>478</sub>	x <sub>479</sub>	x <sub>480</sub>	x <sub>481</sub>	x <sub>482</sub>	x <sub>483</sub>	x <sub>484</sub>	x <sub>485</sub>	x <sub>486</sub>	x <sub>487</sub>	x <sub>488</sub>	x <sub>489</sub>	x <sub>490</sub>	x <sub>491</sub>	x <sub>492</sub>	x <sub>493</sub>	x <sub>494</sub>	x <sub>495</sub>	x <sub>496</sub>	x <sub>497</sub>	x <sub>498</sub>	x <sub>499</sub>	x <sub>500</sub>	x <sub>501</sub>	x <sub>502</sub>	x <sub>503</sub>	x <sub>504</sub>	x <sub>505</sub>	x <sub>506</sub>	x <sub>507</sub>	x <sub>508</sub>	x <sub>509</sub>	x <sub>510</sub>	x <sub>511</sub>	x <sub>512</sub>	x <sub>513</sub>	x <sub>514</sub>	x <sub>515</sub>	x <sub>516</sub>	x <sub>517</sub>	x <sub>518</sub>	x <sub>519</sub>	x <sub>520</sub>	x <sub>521</sub>	x <sub>522</sub>	x <sub>523</sub>	x <sub>524</sub>	x <sub>525</sub>	x <sub>526</sub>	x <sub>527</sub>	x <sub>528</sub>	x <sub>529</sub>	x <sub>530</sub>	x <sub>531</sub>	x <sub>532</sub>	x <sub>533</sub>	x <sub>534</sub>	x <sub>535</sub>	x <sub>536</sub>	x <sub>537</sub>	x <sub>538</sub>	x <sub>539</sub>	x <sub>540</sub>	x <sub>541</sub>	x <sub>542</sub>	x <sub>543</sub>	x <sub>544</sub>	x <sub>545</sub>	x <sub>546</sub>	x <sub>547</sub>	x <sub>548</sub>	x <sub>549</sub>	x <sub>550</sub>	x <sub>551</sub>	x <sub>552</sub>	x <sub>553</sub>	x <sub>554</sub>	x <sub>555</sub>	x <sub>556</sub>	x <sub>557</sub>	x <sub>558</sub>	x <sub>559</sub>	x <sub>560</sub>	x <sub>561</sub>	x <sub>562</sub>	x <sub>563</sub>	x <sub>564</sub>	x <sub>565</sub>	x <sub>566</sub>	x <sub>567</sub>	x <sub>568</sub>	x <sub>569</sub>	x <sub>570</sub>	x <sub>571</sub>	x <sub>572</sub>	x <sub>573</sub>	x <sub>574</sub>	x <sub>575</sub>	x <sub>576</sub>	x <sub>577</sub>	x <sub>578</sub>	x <sub>579</sub>	x <sub>580</sub>	x <sub>581</sub>	x <sub>582</sub>	x <sub>583</sub>	x <sub>584</sub>	x <sub>585</sub>	x <sub>586</sub>	x <sub>587</sub>	x <sub>588</sub>	x <sub>589</sub>	x <sub>590</sub>	x <sub>591</sub>	x <sub>592</sub>	x <sub>593</sub>	x <sub>594</sub>	x <sub>595</sub>	x <sub>596</sub>	x <sub>597</sub>	x <sub>598</sub>	x <sub>599</sub>	x <sub>600</sub>	x <sub>601</sub>	x <sub>602</sub>	x <sub>603</sub>	x <sub>604</sub>	x <sub>605</sub>	x <sub>606</sub>	x <sub>607</sub>	x <sub>608</sub>	x <sub>609</sub>	x <sub>610</sub>	x <sub>611</sub>	x <sub>612</sub>	x <sub>613</sub>	x <sub>614</sub>	x <sub>615</sub>	x <sub>616</sub>	x <sub>617</sub>	x <sub>618</sub>	x <sub>619</sub>	x <sub>620</sub>	x <sub>621</sub>	x <sub>622</sub>	x <sub>623</sub>	x <sub>624</sub>	x <sub>625</sub>	x <sub>626</sub>	x <sub>627</sub>	x <sub>628</sub>	x <sub>629</sub>	x <sub>630</sub>	x <sub>631</sub>	x <sub>632</sub>	x <sub>633</sub>	x <sub>634</sub>	x <sub>635</sub>	x <sub>636</sub>	x <sub>637</sub>	x <sub>638</sub>	x <sub>639</sub>	x <sub>640</sub>	x <sub>641</sub>	x <sub>642</sub>	x <sub>643</sub>	x <sub>644</sub>	x <sub>645</sub>	x <sub>646</sub>	x <sub>647</sub>	x <sub>648</sub>	x <sub>649</sub>	x <sub>650</sub>	x <sub>651</sub>	x <sub>652</sub>	x <sub>653</sub>	x <sub>654</sub>	x <sub>655</sub>	x <sub>656</sub>	x <sub>657</sub>	x <sub>658</sub>	x <sub>659</sub>	x <sub>660</sub>	x <sub>661</sub>	x <sub>662</sub>	x <sub>663</sub>	x <sub>664</sub>	x <sub>665</sub>	x <sub>666</sub>	x <sub>667</sub>	x <sub>668</sub>	x <sub>669</sub>	x <sub>670</sub>	x <sub>671</sub>	x <sub>672</sub>	x <sub>673</sub>	x <sub>674</sub>	x <sub>675</sub>	x <sub>676</sub>	x <sub>677</sub>	x <sub>678</sub>	x <sub>679</sub>	x <sub>680</sub>	x <sub>681</sub>	x <sub>682</sub>	x <sub>683</sub>	x <sub>684</sub>	x <sub>685</sub>	x <sub>686</sub>	x <sub>687</sub>	x <sub>688</sub>	x <sub>689</sub>	x <sub>690</sub>	x <sub>691</sub>	x <sub>692</sub>	x <sub>693</sub>	x <sub>694</sub>	x <sub>695</sub>	x <sub>696</sub>	x <sub>697</sub>	x <sub>698</sub>	x <sub>699</sub>	x <sub>700</sub>	x <sub>701</sub>	x <sub>702</sub>	x <sub>703</sub>	x <sub>704</sub>	x <sub>705</sub>	x <sub>706</sub>	x <sub>707</sub>	x <sub>708</sub>	x <sub>709</sub>	x <sub>710</sub>	x <sub>711</sub>	x <sub>712</sub>	x <sub>713</sub>	x <sub>714</sub>	x <sub>715</sub>	x <sub>716</sub>	x <sub>717</sub>	x <sub>718</sub>	x <sub>719</sub>	x <sub>720</sub>	x <sub>721</sub>	x <sub>722</sub>	x <sub>723</sub>	x <sub>724</sub>	x <sub>725</sub>	x <sub>726</sub>	x <sub>727</sub>	x <sub>728</sub>	x <sub>729</sub>	x <sub>730</sub>	x <sub>731</sub>	x <sub>732</sub>	x <sub>733</sub>	x <sub>734</sub>	x <sub>735</sub>	x <sub>736</sub>	x <sub>737</sub>	x <sub>738</sub>	x <sub>739</sub>	x <sub>740</sub>	x <sub>741</sub>	x <sub>742</sub>	x <sub>743</sub>	x <sub>744</sub>	x <sub>745</sub>	x <sub>746</sub>	x <sub>747</sub>	x <sub>748</sub>	x <sub>749</sub>	x <sub>750</sub>	x <sub>751</sub>	x <sub>752</sub>	x <sub>753</sub>	x <sub>754</sub>	x <sub>755</sub>	x <sub>756</sub>	x <sub>757</sub>	x <sub>758</sub>	x <sub>759</sub>	x <sub>760</sub>	x <sub>761</sub>	x <sub>762</sub>	x <sub>763</sub>	x <sub>764</sub>	x <sub>765</sub>	x <sub>766</sub>	x <sub>767</sub>	x <sub>768</sub>	x <sub>769</sub>	x <sub>770</sub>	x <sub>771</sub>	x <sub>772</sub>	x <sub>773</sub>	x <sub>774</sub>	x <sub>775</sub>	x <sub>776</sub>	x <sub>777</sub>	x <sub>778</sub>	x <sub>779</sub>	x <sub>780</sub>	x <sub>781</sub>	x <sub>782</sub>	x <sub>783</sub>	x <sub>784</sub>	x <sub>785</sub>	x <sub>786</sub>	x <sub>787</sub>	x <sub>788</sub>	x <sub>789</sub>	x <sub>790</sub>	x <sub>791</sub>	x <sub>792</sub>	x <sub>793</sub>	x <sub>794</sub>	x <sub>795</sub>	x <sub>796</sub>	x <sub>797</sub>	x <sub>798</sub>	x <sub>799</sub>	x <sub>800</sub>	x <sub>801</sub>	x <sub>802</sub>	x <sub>803</sub>	x <sub>804</sub>	x <sub>805</sub>	x <sub>806</sub>	x <sub>807</sub>	x <sub>808</sub>	x <sub>809</sub>	x <sub>810</sub>	x <sub>811</sub>	x <sub>812</sub>	x <sub>813</sub>	x <sub>814</sub>	x <sub>815</sub>	x <sub>816</sub>	x <sub>817</sub>	x <sub>818</sub>	x <sub>819</sub>	x <sub>820</sub>	x <sub>821</sub>	x <sub>822</sub>	x <sub>823</sub>	x <sub>824</sub>	x <sub>825</sub>	x <sub>826</sub>	x <sub>827</sub>	x <sub>828</sub>	x <sub>829</sub>	x <sub>830</sub>	x <sub>831</sub>	x <sub>832</sub>	x <sub>833</sub>	x <sub>834</sub>	x <sub>835</sub>	x<
-------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	----