

# Numeričko modeliranje i optimizacija ortogonalnog rezanja aluminijske legure EN AW 6082 T6

---

**Dumanić Labetić, Ivana**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:179:772641>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture - University of Split](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**Ivana Dumanić Labetić**

**NUMERIČKO MODELIRANJE I  
OPTIMIZACIJA ORTOGONALNOG  
REZANJA ALUMINIJEVE LEGURE  
EN AW 6082 T6**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2023.



SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**Ivana Dumanić Labetić**

***Numeričko modeliranje i optimizacija ortogonalnog  
rezanja aluminijeve legure EN AW 6082 T6***

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2023.

## Bibliografski podaci

Disertacija je izrađena na Zavodu za proizvodno strojarstvo, Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu.

Mentor: prof. dr. sc. Sonja Jozić

Rad br. 186

---

### PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

Ključne riječi: ortogonalno rezanje, sile rezanja, temperatura u zoni rezanja, regresijska analiza, genetski algoritam, spregnuta Euler-Lagrangeova formulacija, zakon očvršćivanja, tokarenje

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarstvo

Znanstvena grana: Proizvodno strojarstvo

Institucija na kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: prof. dr. sc. Sonja Jozić

Broj stranica: 226

Broj slika: 95

Broj tablica: 51

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 181

---

## **Podaci o ocjeni i obrani disertacije**

Povjerenstvo za ocjenu disertacije:

1. prof. dr. sc. Dražen Bajić, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split
2. prof. dr. sc. Zoran Jurković, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka
3. prof. dr. sc. Vedrana Cvitanić, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split
4. prof. dr. sc. Branimir Lela, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split
5. prof. dr. sc. Sandro Nižetić, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split

Povjerenstvo za obranu disertacije:

1. prof. dr. sc. Dražen Bajić, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split
2. prof. dr. sc. Zoran Jurković, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka
3. prof. dr. sc. Vedrana Cvitanić, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split
4. prof. dr. sc. Branimir Lela, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split
5. prof. dr. sc. Sandro Nižetić, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split

Disertacija obranjena dana: 06. srpnja 2023.

# Numeričko modeliranje i optimizacija ortogonalnog rezanja aluminijske legure EN AW 6082 T6

## Sažetak:

Pri obradi odvajanjem čestica vrijede različite zakonitosti vezane uz ponašanje materijala, toplinu, trenje, elastične i plastične deformacije, brzine deformacija i sl. Mehanizam nastajanja odvojene čestice je prilično složen, što dovodi do jednako složenih teorija i modela koji predstavljaju te teorije. Eksperimentalna ispitivanja su dugotrajna i skupa zbog čega postoji potreba za numeričkim modeliranjem procesa.

U radu je, na temelju eksperimentalnih podataka i rezultata dobivenih numeričkim modelima, analizirano ortogonalno rezanje aluminijske legure EN AW 6082 T6. Regresijskom analizom eksperimentalnih podataka dobiveni su matematički modeli koji opisuju ovisnost sila rezanja i temperature o parametrima obrade. Optimalne vrijednosti brzine rezanja i posmaka dobivene su primjenom genetskog algoritma na temelju postavljenih ograničenja i funkcija cilja.

Razmatran je utjecaj ulaznih parametara i numeričkih postavki na predviđanja sila rezanja i temperature u zoni rezanja u numeričkim modelima ortogonalnog rezanja aluminijske legure EN AW 6082 T6 primjenom spregnute Euler-Lagrangeove formulacije. S ciljem unaprjeđenja numeričkih modela razmatrani su različiti zakoni očvršćivanja te uvjeti dodira između alata i obratka. Razvijeni su vlastiti zakoni očvršćivanja. Različiti zakoni očvršćivanja su implementirani u program za analizu metodom konačnih elemenata. Točnost numeričkih modela ispitana je za široki raspon posmaka i brzine rezanja. Hibridnom metodom su predviđene sile rezanja za postupak tokarenja (kosog rezanja). U ovoj metodi su korišteni rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem te geometrijski i kinematički transformacijski modeli. S ciljem validacije predviđene sile rezanja hibridnom metodom, proveden je drugi dio eksperimentalnih istraživanja koji obuhvaća mjerenje sila u postupku tokarenja.

## Ključne riječi:

ortogonalno rezanje, sile rezanja, temperatura u zoni rezanja, regresijska analiza, genetski algoritam, spregnuta Euler-Lagrangeova formulacija, zakon očvršćivanja, tokarenje

# **Numerical modelling and optimisation of orthogonal cutting of aluminium alloy EN AW 6082 T6**

## **Abstract:**

Various laws related to the behaviour of materials, heat, friction, elastic and plastic deformations and deformation rates are applied when machining. The mechanism of the chip formation is quite complex, which leads to equally complex theories and models representing these theories. Experimental tests are time-consuming and expensive, therefore there is a need for numerical modelling of the process.

In this thesis, the orthogonal cutting process of aluminium alloy EN AW 6082 T6 based on experimental data and results obtained with numerical models is analysed. Mathematical models were obtained by regression analysis of experimental data that describe the dependence of cutting forces and temperature on processing parameters. Optimal values of cutting speed and feed were obtained by applying a genetic algorithm based on set constraints and objective functions.

The influence of input parameters and numerical settings on predictions of cutting forces and temperature in the cutting zone in numerical models of orthogonal cutting of EN AW 6082 T6 alloy using the coupled Euler-Lagrange formulation was considered. With the view of improving numerical models, different hardening laws and contact conditions between the tool and the workpiece were considered. Also, hardening laws have been developed. Different hardening laws were implemented in the finite element analysis program. The accuracy of the numerical models was tested for a wide range of feed and cutting speeds. The hybrid method was implemented to predict cutting forces for the turning process. In this procedure, the results obtained by numerical modelling and the geometric and kinematic transformation models were applied. In order to validate the predicted cutting force by the hybrid method, the second part of the experimental research was carried out, which includes the measurement of cutting forces in the turning process.

## **Keywords:**

orthogonal cutting, cutting forces, temperature in the cutting zone, regression analysis, genetic algorithm, coupled Euler-Lagrange formulation, hardening law, turning





## Zahvala

*Zahvaljujem svojoj mentorici prof. dr. sc. Sonji Jozić koja je u svakom trenutku nesebično dijelila vlastito znanje i iskustvo. Zahvaljujem joj što je uvijek imala vremena saslušati me i razmotriti moje ideje te što me uvijek poticala u njihovoj realizaciji. Veliku zahvalu joj dugujem zbog uloženog truda, vremena, strpljenja, razumijevanja te ohrabrujućih razgovora. Omogućila mi je svu potrebnu literaturu, opremu te vrhunske tehničke uvjete.*

*Veliku zahvalu dugujem prof. dr. sc. Draženu Bajiću na nesebičnom pomaganju te konstruktivnim razgovorima. Svojim znanjem i iskustvom mi je pomagao u stjecanju novih znanja te mi omogućio sve što je bilo potrebno za realizaciju ovog rada.*

*Zahvaljujem se članovima Povjerenstva za ocjenu i obranu ovog doktorskog rada, a posebno se zahvaljujem prof. dr. sc. Vedrani Cvitanić za pomoć i sugestije tijekom izrade doktorskog rada.*

*Osobito se zahvaljujem dragim kolegicama Amandi i Marini na beskrajnoj podršci, ohrabrenju te puno ljubavi i smijeha. Zahvaljujem se svim kolegicama i kolegama što su uvijek bili dostupni, susretljivi, otvoreni za suradnju i spremni pomoći.*

*Posebnu zahvalnost dugujem svojim roditeljima i sestrama koji su me od početka bodrili i vjerovali u mene, dali mi snagu, nadu i vjeru te koji su uvijek bili tu, uz mene. Hvala obitelji, prijateljicama i prijateljima na ljubavi, razumijevanju i podršci.*

*Osobitu zahvalu dugujem suprugu Ivanu na ljubavi, neprocjenjivom razumijevanju te vjeri u moj uspjeh, ohrabrenju i bezuvjetnoj potpori.*

## Sadržaj

|   |      |
|---|------|
| Bibliografski podaci.....   | ii   |
| Podaci o ocjeni i obrani disertacije .....  | iii  |
| Sažetak .....   | iv   |
| Abstract.....   | v    |
| Zahvala.....  | vii  |
| Popis tablica .....   | xii  |
| Popis slika .....   | xv   |
| Popis oznaka .....  | xxi  |
| Popis kratica.....  | xxix |
| <br>  |      |
| 1. UVOD.....  | 1    |
| 1.1. Motivacija za provođenje istraživanja .....                                  | 1    |
| 1.2. Ciljevi i hipoteza znanstvenog istraživanja .....                            | 3    |
| 1.3. Znanstveni doprinosi rada.....   | 4    |
| 1.4. Metodologija znanstvenog istraživanja .....                                  | 5    |
| 1.5. Struktura rada.....  | 7    |
| 2. OSNOVE OBRADJE ODVAJANJEM ČESTICA.....   | 9    |
| 2.1. Dinamika procesa odvajanja čestica .....                                     | 9    |
| 2.2. Toplinske pojave pri obradi odvajanjem čestica .....                         | 12   |
| 3. OSNOVNE POSTAVKE NUMERIČKOG MODELA OBRADJE ODVAJANJEM<br>ČESTICA.....          | 18   |
| 3.1. Elasto-viskoplastičnih konstitutivni model pri povišenim temperaturama ..... | 19   |
| 3.2. Modeli trenja i uvjeti dodira između alata i obratka.....                    | 31   |
| 3.3. Modeliranje nastajanja odvojene čestice .....                                | 35   |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 4.     | PREDVIĐANJA IZLAZNIH VELIČINA OBRADNE ODVAJANJEM ČESTICA U<br>NUMERIČKIM MODELIMA TEMELJENIM NA METODI KONAČNIH<br>ELEMENATA ..... | 38 |
| 4.1.   | Predviđanje sila rezanja u obradi odvajanjem čestica .....   | 43 |
| 4.2.   | Predviđanje raspodjele temperature u zoni rezanja .....  | 46 |
| 4.3.   | Primjena spregnute Euler-Lagrangeova (CEL) formulacije u predviđanju<br>izlaznih veličina .....                                    | 48 |
| 5.     | EKSPERIMENTALNI RAD .....  | 59 |
| 5.1.   | Sredstva i uvjeti eksperimenata .....  | 59 |
| 5.1.1. | Alatni stroj .....   | 59 |
| 5.1.2. | Alat i rezne pločice .....   | 60 |
| 5.1.3. | Obradak .....  | 61 |
| 5.1.4. | Mjerni uređaji .....   | 62 |
| 5.2.   | Prethodna ispitivanja .....  | 65 |
| 5.3.   | Planiranje eksperimenata .....   | 67 |
| 5.4.   | Eksperimentalni rezultati .....  | 68 |
| 6.     | STATISTIČKA OBRADA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA I OPTIMIZACIJA<br>ULAZNIH PARAMETARA ORTOGONALNOG REZANJA .....                      | 74 |
| 6.1.   | Metodologija izrade i vrednovanja matematičkih modela .....  | 74 |
| 6.2.   | Statistička obrada eksperimentalnih rezultata .....  | 75 |
| 6.2.1. | Matematički modeli komponenti sile ortogonalnog rezanja .....  | 76 |
| 6.2.2. | Matematički model temperature u zoni rezanja .....   | 78 |
| 6.3.   | Analiza utjecaja brzine rezanja i posmaka na komponente sile ortogonalnog rezanja<br>i temperaturu u zoni rezanja .....            | 80 |
| 6.4.   | Optimizacija ortogonalnog rezanja genetskim algoritmom .....   | 82 |
| 7.     | NUMERIČKO MODELIRANJE ORTOGONALNOG REZANJA .....   | 85 |
| 7.1.   | Statistička obrada rezultata simulacija .....  | 91 |
| 7.1.1. | Matematički modeli komponenti sile ortogonalnog rezanja .....  | 91 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 7.1.2. | Matematički model vremena potrebnog za provedbu simulacije .....   | 94  |
| 7.2.   | Optimizacija veličine konačnog elementa kojim se diskretizira obradak<br>genetskim algoritmom .....  | 94  |
| 7.3.   | Numerička provjera rezultata optimizacije.....   | 95  |
| 8.     | NUMERIČKA ANALIZA: PROCJENA TOČNOSTI PREDVIĐANJA SILA<br>REZANJA I TEMPERATURE U ZONI REZANJA ZA RAZLIČITE ULAZNE<br>PARAMETRE .....   | 99  |
| 8.1.   | Rezultati numeričke analize.....   | 99  |
| 8.2.   | Predviđanje sila rezanja i temperature u zoni rezanja za različite ulazne<br>parametre primjenom modificiranog numeričkog modela.....  | 107 |
| 9.     | NUMERIČKO PREDVIĐANJE ORTOGONALNOG REZANJA PRIMJENOM<br>IZRAĐENIH MODELA TE RAZLIČITIH ZAKONA OČVRŠĆIVANJA .....   | 111 |
| 9.1.   | Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja .....   | 112 |
| 9.2.   | Izmijenjeni Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja.....  | 113 |
| 9.3.   | Prijedlog zakona očvršćivanja temeljenog na Johnson-Cookovom zakonu<br>očvršćivanja i Arrheniusovoj jednadžbi.....   | 118 |
| 9.4.   | Numerička analiza: procjena točnosti predviđanja sila rezanja i temperature u<br>zoni rezanja za različite ulazne parametre primjenom zakona očvršćivanja temeljenog<br>na Johnson-Cookovom zakonu očvršćivanja i Arrheniusovoj jednadžbi .....  | 125 |
| 9.5.   | Prijedlog zakona očvršćivanja koji se temelji na Johnson-Cookovom<br>zakonu očvršćivanja, Arrheniusovoj jednadžbi te sadržava tangens hiperbolnu<br>funkciju deformacije .....   | 131 |
| 9.6.   | Numerička analiza: procjena točnosti predviđanja sila rezanja i temperature u<br>zoni rezanja za različite ulazne parametre primjenom zakona očvršćivanja koji se temelji<br>na Johnson-Cookovom zakonu očvršćivanja, Arrheniusovoj jednadžbi i sadržava<br>tangens hiperbolnu funkciju deformacije..... | 136 |

|   |     |
|---|-----|
| 10. STATISTIČKA OBRADA REZULTATA DOBIVENIH NUMERIČKIM<br>MODELIRANJE I OPTIMIZACIJA ULAZNIH PARAMETARA ORTOGONALNOG<br>REZANJA..... | 145 |
| 10.1. JCA zakon očvršćivanja .....  | 145 |
| 10.1.1. Matematički modeli komponenti sile ortogonalnog rezanja .....   | 145 |
| 10.1.2. Matematički model temperature u zoni rezanja .....  | 147 |
| 10.2. JCA_TANH zakon očvršćivanja .....   | 148 |
| 10.2.1. Matematički modeli komponenti sile ortogonalnog rezanja .....   | 148 |
| 10.2.2. Matematički model temperature u zoni rezanja .....  | 149 |
| 10.3. Optimizacija ortogonalnog rezanja genetskim algoritmom.....   | 150 |
| 11. PREDVIĐANJE SILE REZANJA ZA POSTUPAK TOKARENJA HIBRIDNOM<br>METODOM.....  | 152 |
| 11.1. Mehanika ortogonalnog rezanja .....   | 152 |
| 11.2. Mehanika tokarenja (kosog rezanja).....   | 154 |
| 11.3. Eksperimentalni rad – tokarenje .....   | 160 |
| 11.4. Predviđanje sile rezanja za postupak tokarenja .....  | 160 |
| 12. ZAKLJUČAK.....  | 165 |
| LITERATURA .....  | 170 |
| PRILOZI .....   | 183 |
| PRILOG A .....  | 183 |
| PRILOG B .....  | 188 |
| PRILOG C .....  | 191 |
| Životopis .....   | 194 |
| Curriculum Vitae .....  | 195 |

## Popis tablica

|   |    |
|---|----|
| Tablica 4.1. Pregled radova u kojima je primijenjena CEL formulacija za simulaciju obrade odvajanjem čestica.....                           | 56 |
| Tablica 5.1. Glavne karakteristike univerzalne tokarilice .....   | 60 |
| Tablica 5.2. Kemijski sastav, mehanička i fizikalna svojstva legure EN AW 6082 T6 .....   | 61 |
| Tablica 5.3. Izmjerene vrijednosti glavne sile rezanja i posmične sile.....   | 67 |
| Tablica 5.4. Eksperimentalni rezultati – srednje vrijednosti komponenti sile rezanja .....  | 67 |
| Tablica 5.5. Plan eksperimenata za dobivanje modela odzivnih veličina glavne sile rezanja, posmične sile i temperature u zoni rezanja ..... | 68 |
| Tablica 5.6. Ulazne veličine i rezultati mjerenja .....   | 69 |
| Tablica 5.7. Parametri obrade i rezultati mjerenja debljine odvojene čestice .....  | 72 |
| Tablica 6.1. Analiza varijance za glavnu silu rezanja $F_c$ .....   | 76 |
| Tablica 6.2. Rezultati regresijske analize za glavnu silu rezanja $F_c$ .....   | 76 |
| Tablica 6.3. Analiza varijance za posmičnu silu $F_f$ .....   | 77 |
| Tablica 6.4. Rezultati regresijske analize za posmičnu silu $F_f$ .....   | 78 |
| Tablica 6.5. Analiza varijance za temperaturu u zoni rezanja .....  | 79 |
| Tablica 6.6. Rezultati regresijske analize za temperaturu u zoni rezanja .....  | 79 |
| Tablica 6.7. Vrijednosti parametara korištenih u optimizaciji.....  | 83 |
| Tablica 6.8. Predviđene vrijednosti izlaznih veličina za optimalne vrijednosti ulaznih veličina.....  | 83 |
| Tablica 7.1. Vrijednosti parametara Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja za leguru aluminijsku EN AW 6082 T6.....                           | 87 |
| Tablica 7.2. Vrijednost parametara koji opisuju inicijaciju i razvoj oštećenja u materijalu. EN AW 6082 T6 [156], [157].....                | 88 |
| Tablica 7.3. Značajke interakcije između obratka i alata.....   | 88 |
| Tablica 7.4. Usporedba eksperimentalnih rezultata i rezultata numeričkih simulacija .....   | 89 |
| Tablica 7.5. Ulazne veličine i njihove razine.....  | 90 |
| Tablica 7.6. Box-Behnkenov plan simulacija (virtualni eksperimenti) .....   | 91 |

|   |     |
|---|-----|
| Tablica 7.7. Analiza varijance za pogrešku u predviđanju glavne sile rezanja $F_c$ .....  | 92  |
| Tablica 7.8. Rezultati regresijske analize za pogrešku u predviđanju glavne sile rezanja $F_c$ ..   | 92  |
| Tablica 7.9. Analiza varijance za pogrešku u predviđanju posmične sile $F_f$ .....  | 93  |
| Tablica 7.10. Rezultati regresijske analize za pogrešku u predviđanju posmične sile $F_f$ .....   | 93  |
| Tablica 7.11. Vrijednosti parametara korištenih u optimizaciji.....   | 95  |
| Tablica 8.1. Ulazne veličine te rezultati numeričkih simulacija .....   | 103 |
| Tablica 8.2. Parametri obrade i rezultati mjerenja debljine odvojene čestice .....  | 106 |
| Tablica 8.3. Ulazne veličine te rezultati numeričkih simulacija za modificirani numerički<br>model; koeficijent prijelaza topline 100 kW/m <sup>2</sup> K .....       | 109 |
| Tablica 8.4. Ulazne veličine te rezultati numeričkih simulacija za modificirani numerički<br>model; koeficijent prijelaza topline 150 kW/m <sup>2</sup> K .....       | 110 |
| Tablica 9.1. Parametri Zerilli-Armstrongovog zakona očvršćivanja za<br>EN AW 6082 T6 [159] .....  | 112 |
| Tablica 9.2. Parametri izmijenjenog Zerilli-Armstrongovog zakona očvršćivanja za<br>EN AW 6082 T6.....  | 116 |
| Tablica 9.3. Parametri zakona očvršćivanja temeljenog na Arrheniusovoj jednadžbi za<br>EN AW 6082 T6.....   | 122 |
| Tablica 9.4. Vrijednosti energije aktivacije za promatranu leguru .....   | 122 |
| Tablica 9.5. Parametri JCA zakona očvršćivanja za EN AW 6082 T6 .....   | 123 |
| Tablica 9.6. Ulazne veličine te rezultati numeričkih simulacija primjenom JCA zakona<br>očvršćivanja; koeficijent prijelaza topline 150 kW/m <sup>2</sup> K.....      | 125 |
| Tablica 9.7. Parametri JCA_TANH zakona očvršćivanja za EN AW 6082 T6 .....  | 134 |
| Tablica 9.8. Ulazne veličine te rezultati numeričkih simulacija primjenom JCA_TANH<br>zakona očvršćivanja; koeficijent prijelaza topline 150 kW/m <sup>2</sup> K..... | 136 |
| Tablica 9.9. Parametri obrade i rezultati mjerenja debljine odvojene čestice .....  | 139 |
| Tablica 10.1. Analiza varijance za glavnu silu rezanja $F_c$ ; rezultati dobiveni numeričkim<br>modeliranjem i primjenom JCA zakona očvršćivanja.....                 | 146 |
| Tablica 10.2. Analiza varijance za posmičnu silu $F_f$ ; rezultati dobiveni numeričkim<br>modeliranjem i primjenom JCA zakona očvršćivanja.....                       | 146 |



|   |     |
|---|-----|
| Tablica 10.3. Analiza varijance za temperaturu u zoni rezanja; rezultati dobiveni<br>numeričkim modeliranjem i primjenom JCA zakona očvršćivanja.....       | 147 |
| Tablica 10.4. Analiza varijance za glavnu silu rezanja $F_c$ ; rezultati dobiveni numeričkim<br>modeliranjem i primjenom JCA_TANH zakona očvršćivanja.....  | 148 |
| Tablica 10.5. Analiza varijance za posmičnu silu $F_f$ ; rezultati dobiveni numeričkim<br>modeliranjem i primjenom JCA_TANH zakona očvršćivanja.....        | 149 |
| Tablica 10.6. Analiza varijance za temperaturu u zoni rezanja; rezultati dobiveni<br>numeričkim modeliranjem i primjenom JCA_TANH zakona očvršćivanja ..... | 150 |
| Tablica 10.7. Ciljne vrijednosti korištene u optimizaciji.....  | 150 |
| Tablica 10.8. Predviđene vrijednosti izlaznih veličina za optimalne vrijednosti ulaznih<br>veličina.....  | 151 |
| Tablica 11.1. Ulazni parametri i eksperimentalni rezultati u postupku tokarenja .....   | 160 |
| Tablica 11.2. Ulazni parametri i podaci iz ortogonalnog rezanja na temelju rezultata<br>dobivenih numeričkim modeliranjem .....                             | 161 |
| Tablica 11.3. Usporedba eksperimentalnih rezultata sile rezanja i predviđanja sile rezanja<br>hibridnom metodom za postupak tokarenja .....                 | 163 |

## Popis slika

|   |    |
|---|----|
| Slika 1.1. Struktura disertacije .....  | 8  |
| Slika 2.1. Vrste rezanja: a) ortogonalno (dvodimenzijnsko), b) koso (trodimenzijnsko) [2] .....   | 9  |
| Slika 2.2. Usporedba ortogonalnog i kosog rezanja: a) mehanika ortogonalnog rezanja,<br>b) mehanika kosog rezanja .....                         | 10 |
| Slika 2.3. Geometrija ortogonalnog modela .....   | 11 |
| Slika 2.4. Prikaz karakterističnih dimenzija za određivanje koeficijenta sabijanja odvojene<br>čestice [3].....                                 | 12 |
| Slika 2.5 Shematski prikaz toplinskih izvora pri obradi odvajanjem čestica .....  | 13 |
| Slika 2.6. Shematski prikaz toplinskih ponora pri obradi odvajanjem čestica .....   | 14 |
| Slika 2.7. Zone plastičnih deformacija za proces stvaranja odvojene čestice .....   | 16 |
| Slika 3.1. Grafički prikaz raspodjele smičnog naprezanja koje se javlja uslijed trenja te<br>tlačnog naprezanja na prednjoj površini alata..... | 32 |
| Slika 3.2. Dijagram kontaktnog tlaka i udaljenost površina u dodiru.....  | 34 |
| Slika 4.1. ALE formulacija s: a) Eulerovim i Lagrangeovim granicama i b) Lagrangeovim<br>granicama [43] .....                                   | 40 |
| Slika 4.2. CEL formulacija .....  | 41 |
| Slika 4.3. Prikaz EVF vrijednosti i odgovarajućih granica materijala [47] .....   | 41 |
| Slika 4.4. Ulazni parametri, numeričke postavke i rezultati numeričkih simulacija .....   | 43 |
| Slika 4.5. Usporedba temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim simulacijama i<br>dobivene eksperimentalnim mjerenjima [5] .....          | 47 |
| Slika 4.6. Izgled alata i obratka [123] .....   | 49 |
| Slika 4.7. Shematski prikaz rezne pločice i obratka [127].....  | 50 |
| Slika 4.8. Shematski prikaz glodala i obratka [52] .....  | 51 |
| Slika 4.9. Utjecaj veličine kvadratnog elementa u ravnini rezanja na predviđanja sila rezanja<br>u numeričkim simulacijama [130] .....          | 52 |
| Slika 4.10. Izgled alata i obratka [131] .....  | 53 |
| Slika 5.1. Univerzalna tokarilica.....  | 59 |

|  |    |
|--|----|
| Slika 5.2. Tokarski nož .....  | 60 |
| Slika 5.3. Rezna pločica za tokarenje .....  | 60 |
| Slika 5.4. Oprema za mjerenje i obradu sila rezanja te grafičko sučelje softvera Next View .....   | 62 |
| Slika 5.5. Prikaz rezultata mjerenja infracrvenom kamerom i grafičko sučelje softvera Altair .....   | 63 |
| Slika 5.6. Eksperimentalni postav za mjerene komponenti sile rezanja i temperature u zoni rezanja .....  | 64 |
| Slika 5.7. Oprema za mjerenje geometrije odvojene čestice .....  | 65 |
| Slika 5.8. Parametri procesa i prikaz sila pri ortogonalnom rezanju .....  | 66 |
| Slika 5.9. Sile rezanja u funkciji vremena za prethodna ispitivanja u postupku ortogonalnog rezanja ( $v_c = 186$ m/min, $f = 0,05$ mm/o, $a_p = 3$ mm) .....  | 66 |
| Slika 5.10. Izmjerena temperatura u zoni rezanja za $v_c = 93$ m/min, $f = 0,05$ mm/o.....   | 70 |
| Slika 5.11. Primjer snimka raspodjele temperature za $v_c = 93$ m/min, $f = 0,05$ mm/o.....  | 70 |
| Slika 5.12. Izmjerena temperatura u zoni rezanja za $v_c = 233$ m/min, $f = 0,08$ mm/o.....  | 70 |
| Slika 5.13. Primjer snimka raspodjele temperature za $v_c = 233$ m/min, $f = 0,08$ mm/o .....  | 71 |
| Slika 5.14. Izmjerena temperatura u zoni rezanja za $v_c = 373$ m/min, $f = 0,11$ mm/o.....  | 71 |
| Slika 5.15. Primjer snimka raspodjele temperature za $v_c = 373$ m/min, $f = 0,11$ mm/o.....   | 71 |
| Slika 5.16. Utjecaj brzine rezanja i posmaka na koeficijent sabijanja.....   | 72 |
| Slika 5.17. Primjeri mjerenja debljine odvojene čestice za različite parametre obrade:<br>a) $v_c = 93$ m/min, $f = 0,05$ mm/o, b) $v_c = 373$ m/min, $f = 0,05$ mm/o,<br>c) $v_c = 93$ m/min, $f = 0,08$ mm/o, d) $v_c = 373$ m/min, $f = 0,08$ mm/o,<br>e) $v_c = 93$ m/min, $f = 0,11$ mm/o, f) $v_c = 373$ m/min, $f = 0,11$ mm/o..... | 73 |
| Slika 6.1. Usporedba predviđanja komponenti sile ortogonalnog rezanja primjenom matematičkih modela i eksperimentalnih vrijednosti .....   | 78 |
| Slika 6.2. Usporedba predviđanja temperature u zoni rezanja primjenom matematičkog modela i eksperimentalnih vrijednosti .....   | 80 |
| Slika 6.3. Utjecaj brzine rezanja i posmaka na izlazne veličine procesa.....   | 81 |
| Slika 7.1. Shematski prikaz obratka i alata u $xy$ ravnini za primjer ortogonalnog rezanja.....  | 86 |

|  |     |
|--|-----|
| Slika 7.2. Prikaz diskretizacije obratka i alata u $xy$ ravnini .....  | 86  |
| Slika 7.3. Koraci za definiranje odgovarajućih ulaznih parametara i numeričkih postavki za modeliranje obrade odvajanjem čestica .....   | 90  |
| Slika 7.4. Prikaz raspodjele ekvivalentnog von Mises naprezanja .....  | 95  |
| Slika 7.5. Raspodjela temperature u zoni rezanja: a) rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem, b) eksperimentalni rezultati .....  | 96  |
| Slika 7.6. Temperatura u zoni rezanja: eksperimentalni rezultati.....  | 97  |
| Slika 7.7. Temperatura u zoni rezanja: rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem.....   | 97  |
| Slika 8.1. Rezultati dobiveni numeričkim postupkom; sile rezanja u funkciji vremena za $v_c = 373$ m/min, $f = 0,08$ mm/o.....   | 100 |
| Slika 8.2. Rezultati dobiveni numeričkim postupkom; raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja za $v_c = 373$ m/min, $f = 0,08$ mm/o ..... | 100 |
| Slika 8.3. Izgled odvojene čestice nakon 0,0015 s za $v_c = 373$ m/min, $f = 0,08$ mm/o:<br>a) $\tau_y = 250$ MPa , b) $\tau_y = 170$ MPa .....  | 101 |
| Slika 8.4. Usporedba ekvivalentnog naprezanja u vremenu za različite smične granice tečenja za $v_c = 373$ m/min, $f = 0,08$ mm/o.....   | 101 |
| Slika 8.5. Usporedba komponenti sile rezanja u vremenu za različite smične granice tečenja za $v_c = 373$ m/min, $f = 0,08$ mm/o.....  | 102 |
| Slika 8.6. Temperatura u zoni rezanja za $v_c = 373$ m/min, $f = 0,08$ mm/o .....  | 102 |
| Slika 8.7. Usporedba vrijednosti glavne sile rezanja predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti.....   | 104 |
| Slika 8.8. Usporedba vrijednosti posmične sile predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti.....   | 104 |
| Slika 8.9. Usporedba vrijednosti temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti .....   | 105 |
| Slika 8.10. Primjer raspodjele Eulerovog volumnog udjela materijala za $v_c = 373$ m/min, $f = 0,08$ mm/o.....   | 106 |

|   |     |
|---|-----|
| Slika 8.11. Modificirani numerički model; prikaz obratka i alata u xy ravnini za primjer ortogonalnog rezanja.....  | 108 |
| Slika 8.12. Usporedba numeričkih modela u predviđanju izlaznih veličina ortogonalnog rezanja.....   | 109 |
| Slika 9.1. Rezultati dobiveni numeričkim postupkom; raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja za Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja i $v_c = 373$ m/min, $f = 0,05$ mm/o.....      | 113 |
| Slika 9.2. Ovisnost $\ln \sigma$ o $T - T_0$ za različite ekvivalentne plastične deformacije .....  | 114 |
| Slika 9.3. Ovisnost $\ln(e^{L_1} - C_1)$ o $\ln \bar{\epsilon}_p$ .....   | 115 |
| Slika 9.4. Ovisnost naprezanja tečenja o ekvivalentnoj plastičnoj deformaciji za različite zakone očvršćivanja pri razmatranoj vrijednosti $\dot{\bar{\epsilon}}_p = 1000$ s <sup>-1</sup> .....  | 116 |
| Slika 9.5. Rezultati dobiveni numeričkim postupkom; raspodjela Eulerovog volumnog udjela materijala te raspodjela temperature u zoni rezanja za izmijenjeni Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja i $v_c = 373$ m/min, $f = 0,05$ mm/o .....           | 118 |
| Slika 9.6. Ovisnost $\ln \dot{\bar{\epsilon}}_p$ o $\ln \sigma_y$ za različite temperature i razmatranu vrijednost $\bar{\epsilon}_p = 0,01$ .....  | 119 |
| Slika 9.7. Ovisnost $\ln \dot{\bar{\epsilon}}_p$ o $\sigma_y$ za različite temperature i razmatranu vrijednost $\bar{\epsilon}_p = 1$ .....   | 120 |
| Slika 9.8. Ovisnost $\ln[\sinh(\alpha\sigma_y)]$ o $\ln \dot{\bar{\epsilon}}_p$ za različite temperature i vrijednost $\bar{\epsilon}_p = 1$ .....  | 120 |
| Slika 9.9. Ovisnost $\ln[\sinh(\alpha\sigma_y)]$ o $T^{-1}$ za različite brzine ekvivalentne plastične deformacije i razmatranu vrijednost $\bar{\epsilon}_p = 1$ .....   | 121 |
| Slika 9.10. Ovisnost $\ln Z$ o $\ln[\sinh(\alpha\sigma_y)]$ za različite temperature i razmatranu vrijednost $\dot{\bar{\epsilon}}_p = 100$ s <sup>-1</sup> .....   | 122 |
| Slika 9.11. Ovisnost naprezanja tečenja o ekvivalentnoj plastičnoj deformaciji za različite zakone očvršćivanja pri razmatranoj vrijednosti $\dot{\bar{\epsilon}}_p = 1000$ s <sup>-1</sup> i $\dot{\bar{\epsilon}}_p = 100\ 000$ s <sup>-1</sup> ..... | 124 |
| Slika 9.12. Usporedba vrijednosti glavne sile predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti.....   | 126 |
| Slika 9.13. Usporedba vrijednosti posmične sile predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti.....   | 126 |

|  |     |
|--|-----|
| Slika 9.14. Usporedba vrijednosti temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti.....   | 127 |
| Slika 9.15. Raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom za: a) $v_c=93$ m/min, $f = 0,05$ mm/o b) $v_c=233$ m/min, $f = 0,05$ mm/o c) $v_c=373$ m/min, $f = 0,05$ mm/o... | 128 |
| Slika 9.16. Raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom za: a) $v_c=93$ m/min, $f = 0,08$ mm/o b) $v_c=233$ m/min, $f = 0,08$ mm/o c) $v_c=373$ m/min, $f = 0,08$ mm/o... | 129 |
| Slika 9.17. Raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom za: a) $v_c=93$ m/min, $f = 0,11$ mm/o b) $v_c=233$ m/min, $f = 0,11$ mm/o c) $v_c=373$ m/min, $f = 0,11$ mm/o... | 130 |
| Slika 9.18. Usporedba rezultata dobivenih različitim numeričkim modelima.....  | 131 |
| Slika 9.19. Ovisnost naprezanja tečenja o ekvivalentnoj plastičnoj deformaciji za različite zakone očvršćivanja pri razmatranoj vrijednosti $\dot{\epsilon}_p = 50\,000$ s <sup>-1</sup> .....   | 133 |
| Slika 9.20. Ovisnost naprezanja tečenja o ekvivalentnoj plastičnoj deformaciji za različite zakone očvršćivanja pri razmatranoj vrijednost $\dot{\epsilon}_p = 10\,000$ s <sup>-1</sup> i $\dot{\epsilon}_p = 100\,000$ s <sup>-1</sup> .....                            | 134 |
| Slika 9.21. Usporedba vrijednosti glavne sile predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti.....  | 137 |
| Slika 9.22. Usporedba vrijednosti posmične sile predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti.....  | 137 |
| Slika 9.23. Usporedba vrijednosti temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti.....   | 138 |
| Slika 9.24. Raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom za: a) $v_c=93$ m/min, $f = 0,05$ mm/o b) $v_c=233$ m/min, $f = 0,05$ mm/o c) $v_c=373$ m/min, $f = 0,05$ mm/o... | 140 |
| Slika 9.25. Raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom za: a) $v_c=93$ m/min, $f = 0,08$ mm/o b) $v_c=233$ m/min, $f = 0,08$ mm/o c) $v_c=373$ m/min, $f = 0,08$ mm/o... | 141 |

|  |     |
|--|-----|
| Slika 9.26. Raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom za: a) $v_c=93$ m/min, $f = 0,11$ mm/o b) $v_c=233$ m/min, $f = 0,11$ mm/o c) $v_c=373$ m/min, $f = 0,11$ mm/o... | 142 |
| Slika 9.27. Usporedba rezultata dobivenih različitim numeričkim modelima.....  | 143 |
| Slika 11.1. Ovisnost komponenti sile rezanja o debljini neodrezane odvojene čestice [2] ...  | 153 |
| Slika 11.2. Mehanika ortogonalnog rezanja .....  | 154 |
| Slika 11.3. Ravnine u promatranoj točki glavne oštrice alata [178], [179] .....  | 155 |
| Slika 11.4. Ravnine i kutovi tokarskog noža .....  | 155 |
| Slika 11.5. Geometrija poprečnog presjeka neodrezane odvojene čestice [2].....   | 157 |
| Slika 11.6. Određivanje konstanti rubne sile .....   | 161 |
| Slika 11.7. Određivanje sile rezanja za postupak tokarenja; hibridna metoda .....  | 162 |
| Slika 11.8. Pogreška u predviđanju komponenti sile rezanja za postupak tokarenja .....   | 164 |

## POPIS OZNAKA

### Oznaka Opis

|                  |  |
|------------------|--|
| $A$              | granica tečenja pri referentnoj temperaturi i referentnoj brzini deformacije za Johnson-Cookov zakon očvršćivanja    |
| $A'$             | parametar Arrheniusovog zakona očvršćivanja  |
| $A_{sh}$         | površina smicanja  |
| $A_0$            | površina presjeka neodrezane odvojene čestice  |
| $A_I$            | površina segmenta I  |
| $a_p$            | dubina rezanja   |
| $B$              | parametar koji opisuju očvršćivanje materijala uslijed plastičnih deformacija u Johnson-Cookovom zakonu očvršćivanja |
| $b$              | širina rezanja   |
| $b_1$            | širina odvojene čestice  |
| $b_0, b_j$       | koeficijenti polinomnog modela   |
| $b_{ij}, b_{jj}$ | koeficijenti polinomnog modela   |
| $C$              | konstanta brzine deformacije u Johnson-Cookovom zakonu očvršćivanja  |
| $C'_i$           | $i=0,1,\dots,5$ ; parametri Zerilli-Armstrongovog zakona očvršćivanja  |
| $C_i$            | $i=1,2,\dots$ ; parametri izmijenjenog Zerilli-Armstrongovog zakona očvršćivanja                                     |
| $C_{ijkl}^e$     | komponenta tenzora elastičnosti  |
| $D$              | promjer obratka  |
| $D'$             | varijabla koja definira razinu oštećenja materijala  |
| $D_i$            | $i=1,2,\dots,5$ ; parametri Johnson-Cookovog kriterija oštećenja   |
| $d$              | parametar prilagodbe u JCA zakonu očvršćivanja   |
| $E$              | Youngov modul elastičnosti   |
| $e$              | specifična toplinska energija  |



|                 |   |
|-----------------|---|
| $e_{ij}$        | komponenta devijatorske deformacije   |
| $F_c$           | glavna sila rezanja   |
| $F_{cc}$        | glavna komponenta sile koja doprinosi stvaranju odvojene čestice                            |
| $F_{ce}$        | glavna komponenta rubne sile  |
| $F_{c,e}$       | relativna pogreška u predviđanju glavne sile rezanja  |
| $F_c^*$         | ciljna vrijednost, glavna sila rezanja  |
| $F_f$           | posmična sila rezanja   |
| $F_{fc}$        | posmična komponenta sile koja doprinosi stvaranju odvojene čestice                          |
| $F_{fe}$        | posmična komponenta rubne sile  |
| $F_{f,e}$       | relativna pogreška u predviđanju posmične sile  |
| $F_f^*$         | ciljna vrijednost, posmična sila  |
| $F_p$           | sila prodiranja   |
| $F_{sh}$        | sila smicanja   |
| $F_x$           | sila rezanja u smjeru osi $x$   |
| $F_y$           | sila rezanja u smjeru osi $y$   |
| $F_z$           | sila rezanja u smjeru osi $z$   |
| $f$             | posmak po okretaju obratka  |
| $f_y$           | funkcija tečenja  |
| $G$             | modul smičnosti   |
| $g$             | funkcija plastičnog potencijala   |
| $H_\delta$      | parametri očvršćivanja  |
| $H_v$           | visina dijela modela koji je ispunjen prazninom u spregnutoj Euler-Lagrangeovoj formulaciji |
| $h$             | debljina neodrezane odvojene čestice  |
| $h_l$           | debljina odvojene čestice   |
| $J_1, J_2, J_3$ | invarijante tenzora naprezanja  |

|                    |   |
|--------------------|---|
| $J'_1, J'_2, J'_3$ | invarijante devijatorskog tenzora naprezanja  |
| $K$                | prostorni modul elastičnosti  |
| $K_{cc}$           | konstanta glavne komponente sile rezanja koja doprinosi stvaranju odvojene čestice  |
| $K_{fc}$           | konstanta posmične komponente sile rezanja koja doprinosi stvaranju odvojene čestice                                      |
| $K_{pc}$           | konstanta sile prodiranja koja doprinosi stvaranju odvojene čestice   |
| $K_{pe}$           | konstanta rubne sile prodiranja   |
| $k_{ce}, K_{ce}$   | konstanta glavne komponente rubne sile  |
| $k_{fe}, K_{fe}$   | konstanta posmične komponente rubne sile  |
| $L$                | parametar prilagodbe u JCA zakonu očvršćivanja  |
| $L_c$              | karakteristična duljina konačnog elementa   |
| $l$                | duljina obrade  |
| $l_c$              | duljina zone klizanja između alata i obratka  |
| $l_p$              | duljina zone lijepljenja  |
| $l_l$              | duljina odvojene čestice  |
| $l_l$              | karakteristična duljina segmenta I  |
| $m$                | parametar koji opisuje omekšavanje materijala uslijed promjene njegove temperature u Johnson-Cookovom zakonu očvršćivanja |
| $N$                | broj konačnih elemenata kojim je diskretiziran sirovac  |
| $n$                | parametar koji opisuju očvršćivanje materijala uslijed plastičnih deformacija u Johnson-Cookovom zakonu očvršćivanja      |
| $n_a$              | parametar Arrheniusovog zakona očvršćivanja   |
| $n_t$              | frekvencija vrtnje glavnog vretena  |
| $P_f$              | ravnina posmičnog gibanja   |
| $P_p$              | natražna ravnina  |
| $P_r$              | referentna ravnina  |

|                 |  |
|-----------------|--|
| $P_s$           | ravnina rezanja  |
| $p_c$           | pravac brzine rezanja  |
| $Q$             | energija aktivacije  |
| $Q_{al}$        | toplina koja sve odvodi u alat   |
| $Q_{ap}$        | toplina koja uzrokuje lokalno zagrijavanje tankog sloja materijala alata   |
| $Q_d$           | toplina generirana u ravnini smicanja  |
| $Q_{ob}$        | toplina koja odlazi u obradak  |
| $Q_{oč}$        | toplina koja odlazi u odvojenu česticu   |
| $Q_{ok}$        | toplina koja odlazi u okolinu  |
| $Q_{pd}$        | toplina generirana zbog plastičnih deformacija neposredno ispred ravnine smicanja  |
| $Q_{tp}$        | toplina generirana na prednjoj površini alata  |
| $Q_{ts}$        | toplina nastala zbog trenja na stražnoj površini alata   |
| $q$             | gustoća toplinskog toka  |
| $q_T$           | gustoća toplinskog toka zbog klizanja  |
| $R$             | rezultantna sila/sila rezanja  |
| $R_e$           | pogreška u predviđanju sile rezanja  |
| $R^2$           | koeficijent determinacije  |
| $R_{adj}^2$     | prilagođeni koeficijent determinacije  |
| $R_{pred}^2$    | predviđeni koeficijent determinacije   |
| $R'$            | univerzalna plinska konstanta'   |
| $R''$           | omjer ekvivalentnog naprezanja pri određenoj brzini deformacije i granice tečenja kad je brzina deformacije jednaka nuli |
| $r_\varepsilon$ | radijus zaobljenja vrha rezne oštrice  |
| $s_{ij}$        | komponenta devijatorskog dijela tenzora naprezanja   |
| $T$             | temperatura (materijala)   |
| $T_e$           | pogreška u predviđanju temperature   |

|                 |  |
|-----------------|--|
| $T_o$           | temperatura okoline                            |
| $T_T$           | temperatura taljenja materijala                |
| $T_0$           | referentna temperatura                         |
| $T^*$           | ciljna vrijednost, temperatura u zoni rezanja  |
| $t$             | CPU vrijeme                                    |
| $U$             | gustoća energije                               |
| $\bar{u}_p$     | ekvivalentni plastični pomak                   |
| $\bar{u}_{p,D}$ | ekvivalentni plastični pomak pri potpunom lomu |
| $\mathbf{v}$    | tenzor brzine                                  |
| $\bar{v}$       | ekvivalentna brzina klizanja                   |
| $v_c$           | brzina rezanja                                 |
| $v_f$           | posmična brzina                                |
| $w$             | parametar JCA_TANH zakona očvršćivanja         |
| $w_i$           | težinski faktor                                |
| $X$             | kodirani ulazni parametri                      |
| $x$             | parametar JCA_TANH zakona očvršćivanja         |
| $y$             | parametar JCA_TANH zakona očvršćivanja         |
| $Z$             | Zener-Hollomonov parametar                     |

## Grčka slova

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| $\alpha$                        | stražnji kut alata  |
| $\alpha_T$                      | koeficijent toplinskog širenja                                      |
| $\alpha'$                       | koeficijent prijelaza topline                                       |
| $\gamma$                        | prednji kut alata   |
| $\gamma_f$                      | prednji kut alata u ravnini $P_f$                                   |
| $\gamma_p$                      | prednji kut alata u ravnini $P_p$                                   |
| $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}$   | tenzor brzine deformacije   |
| $\dot{\epsilon}_{e,ij}$         | elastična komponenta brzine deformacije                             |
| $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_p$ | tenzor brzine plastične deformacije                                 |
| $\dot{\epsilon}_{p,ij}$         | plastična komponenta brzine deformacije                             |
| $\bar{\epsilon}_p$              | ekvivalentna plastična deformacija                                  |
| $\bar{\epsilon}_{p,D}$          | ekvivalentna plastična deformacija pri kojoj dolazi do oštećenja    |
| $\dot{\bar{\epsilon}}_p$        | brzina ekvivalentne plastične deformacije                           |
| $\dot{\epsilon}_0$              | referentna brzina deformacije                                       |
| $\zeta$                         | veličina prodora  |
| $\eta_p$                        | Taylor-Quinney koeficijent  |
| $\eta_t$                        | omjer hidrostatskog naprezanja i von Mises ekvivalentnog naprezanja |
| $\eta_y$                        | kut toka odvojene čestice   |
| $\eta'$                         | udio energije nastale zbog trenja koja se pretvara u toplinu        |
| $\kappa_r$                      | kut namještanja glavne oštrice alata                                |
| $\lambda$                       | koeficijent toplinske vodljivosti                                   |
| $d\lambda$                      | plastični množitelj   |
| $\lambda_s$                     | kut nagiba glavne oštrice alata                                     |
| $\lambda'$                      | Lameova konstanta elastičnosti                                      |

|                |   |
|----------------|---|
| $\mu$          | Coulombov koeficijent trenja  |
| $\mu'$         | Lameova konstanta elastičnosti  |
| $\nu$          | Poissonov koeficijent   |
| $\xi$          | koeficijent sabijanja odvojene čestice, stupanj kompresije                    |
| $\xi_b$        | koeficijent sabijanja u smjeru širine obratka                                 |
| $\xi_l$        | koeficijent uzdužnog sabijanja  |
| $\rho$         | gustoća materijala  |
| $\rho_n$       | normalni kut trenja   |
| $\rho'$        | kut vanjskog trenja klizanja  |
| $\sigma$       | tenzor naprezanja   |
| $\sigma_0$     | srednje normalno naprezanje   |
| $\sigma_D$     | tenzor naprezanja oštećenog materijala  |
| $\sigma_{ij}$  | komponenta naprezanja   |
| $\sigma_n$     | normalno tlačno naprezanje  |
| $\sigma_y$     | naprezanje tečenja  |
| $\sigma_T$     | inicijalna granica tečenja  |
| $\bar{\sigma}$ | ekvivalentno naprezanje   |
| $\tau$         | smično naprezanje   |
| $\tau_{sh}$    | naprezanje u ravnini smicanja   |
| $\tau_Y$       | smična granica tečenja  |
| $\bar{\tau}$   | ekvivalentno smično naprezanje  |
| $\phi$         | kut smicanja  |
| $\phi_n$       | normalni kut smicanja   |
| $\Omega$       | kut položaja neodrezane odvojene čestice za razmatrani diferencijalni element |
| $\omega$       | raspršena neelastična energija  |
| $\omega_D$     | varijabla stanja  |

$\omega'$  udio generirane topline zbog trenja koji prelazi na prvu površinu

## POPIS KRATICA

| <b>Kratika</b> | <b>Opis</b>   |
|----------------|---|
| ALE            | proizvoljna Lagrange-Eulerova (engl. Arbitrary Lagrange Euler)    |
| ANOVA          | analiza varijance   |
| C3D8RT         | trodimenzijski konačni element                                    |
| CBN            | kubični bor nitrid  |
| CEL            | spregnuta Euler-Lagrangeova (engl. Coupled Euler-Lagrange)        |
| CPE3T          | 3 – čvorni trokutasti konačni element                             |
| CPE4RT         | 4 – čvorni pravokutni konačni element                             |
| CPE6MT         | 6 – čvorni trokutasti konačni element                             |
| EC3D8RT        | trodimenzijski Eulerov element                                    |
| eksp.          | eksperiment   |
| EVF            | Eulerov volumni udio materijala (engl. Eulerian Volume Fractions) |
| FEM            | metoda konačnih elemenata (engl. Finite Element Method)           |
| HKHZ           | hlađenje komprimiranim hladnim zrakom                             |
| iZA            | izmijenjeni Zerilli-Armstrong                                     |
| JC             | Johnson-Cook  |
| JCA            | Johnson-Cook-Arrhenius  |
| JCA_TANH       | Johnson-Cook-Arrhenius-tanh                                       |
| lsqnonlin      | engl. nonlinear least-squares solver                              |
| MKE            | metoda konačnih elemenata   |
| MLQ            | minimalna količina sredstva za podmazivanje                       |
| RT             | referentna točka  |
| SHIP           | sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje                    |
| ZA             | Zerilli-Armstrong   |



## 1. UVOD

### 1.1. Motivacija za provođenje istraživanja

Obrada odvajanjem čestica je jedan od najzastupljenijih postupaka obrade metala u proizvodnoj industriji pri čemu se višak materijala uklanja mehaničkim djelovanjem reznog alata na predmet obrade. Ovim postupkom mogu se dobiti proizvodi složene geometrije s uskom tolerancijom dimenzija i zahtijevanom kvalitetom obrađene površine. U svim proizvodnim procesima, cilj je dobiti proizvod optimalne kvalitete u što kraćem vremenu te uz minimalne troškove. Značajnu ulogu u ostvarenju spomenutih ciljeva ima izbor optimalnih parametara obrade (brzina rezanja, posmak i dubina rezanja), materijala i geometrije reznog alata te sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje - SHIP. Važne izlazne veličine strojne obrade kao što su sile rezanja, temperature, morfologija odvojene čestice, deformacije obratka i alata te mnoge druge mogu se odrediti analitički i prije nego što se stvarno izvede bilo kakvo odvajanje materijala na alatnom stroju. Izbor ulaznih parametara obrade odvajanjem čestica još uvijek je zasnovan na iskustvu operatera, preporučenim vrijednostima te skupim i dugotrajnim eksperimentalnim ispitivanjima. Također, eksperimentalni rezultati vrijede samo za eksperimentalne uvjete te uvelike ovise o točnosti kalibracije mjerne opreme. S ekonomskog gledišta i s gledišta održive proizvodnje, eksperimentalna ispitivanja nisu u cijelosti opravdana. Održiva proizvodnja, u pogledu postupka obrade, može se ostvariti kroz smanjenje potrošnje energije, materijala i vode, kroz smanjenje korištenja otrovnih i nerazgradivih kemikalija te poboljšanje radnih uvjeta (kao što su ergonomija, zdravlje i sigurnost) [1].

Iz navedenog, može se zaključiti da postoji potreba za alternativnim pristupima koji će broj eksperimenata značajno smanjiti. Budući da je potrebna validacija modela, a jedini način da se to osigura je stvarno testiranje rezultata modela u stvarnim uvjetima i usporedba, eksperimentalna mjerenja se ne mogu u potpunosti eliminirati. Pri obradi odvajanjem čestica vrijede različite zakonitosti vezane uz ponašanje materijala, toplinu, trenje, elastične i plastične deformacije, brzine deformacija i sl. Mehanizam nastajanja odvojene čestice je prilično složen, što dovodi do jednako složenih teorija i modela koji predstavljaju te teorije. Promjena svojstava materijala obratka i alata te geometrijskih karakteristika alata, parametara obrade (brzina rezanja, posmak i dubina rezanja), primjena SHIPa i interakcija svega navedenoga u istom sustavu povećava složenost modela. Zbog toga se u većini istraživanja, vezanih uz analitičko i numeričko modeliranje, primjenjuje jednostavnija konfiguracija poznata kao ortogonalno

rezanje gdje vrijedi ravninsko stanje deformacije. Ortogonalno rezanje predstavlja dvodimenzijski mehanički problem uz pretpostavku da širina odvojene čestice ostaje konstantna cijelo vrijeme obrade. Pouzdano modeliranje procesa odvajanja čestica ovisi o pravilnom definiranju spomenutih zakonitosti. Pojednostavljenim analitičkim modelima moguće je predvidjeti izlazne veličine. Sile rezanja je moguće izračunati ako su poznate konstante materijala obratka preuzete iz različitih baza podataka, potvrđene eksperimentima, ali za složenije procese ne mogu se očekivati pouzdani rezultati. Zbog navedenog, u posljednjih nekoliko desetljeća, numeričko modeliranje obrade odvajanjem čestica dobiva na važnosti. Metoda konačnih elemenata - MKE (engl. Finite Element Method - FEM) ima veliku primjenu u 2D i 3D modeliranju ovog procesa. U relativno kratkom periodu moguće je analizirati veliki broj numeričkih rezultata što omogućuje uštedu na vremenu, materijalu i novcu. Mehanika složenijih operacija trodimenzijskog, tzv. kosog rezanja se zatim procjenjuje pomoću geometrijskih i kinematičkih transformacijskih modela primijenjenih na ortogonalno rezanje [2]. Pri nastajanju odvojene čestice u zoni smicanja i njenoj neposrednoj blizini, dakle malom volumenu, javljaju se izrazito velika tangencijalna i normalna naprezanja. Uzrok tih naprezanja su sile koje nastaju djelovanjem reznog alata na obradak. Njihovo poznavanje ima veliki značaj pri definiranju obradivosti materijala, određivanju trošenja alata, dimenzioniranju elemenata alatnog stroja, određivanju snage stroja, itd. [3]. S druge strane, ukupna snaga utrošena na odvajanje čestica najvećim dijelom se pretvara u toplinu. U prosjeku se do 97 % snage pretvori u toplinu [3]. Povećanjem temperature dolazi do gubitka tvrdoće i čvrstoće materijala alata. To utječe na postojanost alata te dovodi do gubitka reznih sposobnosti alata. Također, povećanjem temperature mijenjaju se sile rezanja, zaostala naprezanja u materijalu, itd. Najveća količina topline se razvija u zoni najvećih deformacija tj. u ravnini smicanja te na prednjoj površini reznog alata koja je u dodiru s odvojenom česticom. U zoni najvećih deformacija dolazi do plastične deformacije i razaranja materijala obratka, a na dodiru prednje površine alata i obratka se razvija toplina zbog trenja. Zbog toga se tim zonama, u analizama obrade odvajanjem čestica, posvećuje najveća pažnja. Generirana toplina nastala pri obradi odvajanjem čestica dovodi do zagrijavanja obratka, alata, odvojene čestice i okoline. Zbog složenog procesa odvajanja čestica javljaju se brojne teškoće prilikom mjerenja temperatura u zoni rezanja: alat i obradak se neprestano gibaju, odvojena čestica ometa mjerenje, otežan je pristup zoni mjerenja i sl.

Krajnji cilj numeričkog modela treba biti predviđanje onih parametara koji su relevantni za značajke proizvoda i procesa kao npr. sile rezanja, temperature u zoni rezanja, naprezanja,

deformacije obratka i alata, oblik odvojene čestice i sl. Numeričke simulacije omogućuju razumijevanje pojava tijekom obrade, ali i definiranje optimalnih ulaznih parametara s ciljem povećanja produktivnosti, smanjenja troškova i sl. Numeričke simulacije još uvijek nisu dovoljno pouzdan alat obzirom da na rezultate simulacija utječu razni parametri [4]. Može se zaključiti da postoji nedostatak razumijevanja procesa te potreba za unapređenjima modela u numeričkim analizama. Bez točnih modela, skupa eksperimentalna istraživanja će i dalje dominirati u razvoju procesa. Sve navedeno upućuje na potrebu za istraživanjem složenog numeričkog modeliranja obrade odvajanjem čestica. Prije svega, potrebno je izabrati formulaciju modela (Eulerova, Lagrangeova, proizvoljna Lagrange-Eulerova ili spregnuta Euler-Lagrangeova) te vremensku integraciju (eksplicitnu ili implicitnu). Zatim, potrebno je odrediti veličinu i oblik mreže odnosno elemenata koji se primjenjuju na alatu i obratku te vrstu dodira između alata i obratka. Zakon očvršćivanja, model trenja i kriterij za nastajanje odvojene čestice su i više nego ključni za pravilno modeliranje procesa odvajanja čestica. Spomenuti nedostaci i izazovi predstavljaju motivaciju za istraživanje. Kao jedan od glavnih ciljeva nameće se razvoj pouzdanog numeričkog modela koji bi trebao predvidjeti relevantne parametre. Primjena numeričkih modela u planiranju obrade odvajanjem čestica može dovesti do boljeg razumijevanja procesa te dati smjernice za provođenje ovih procesa. Navedeno bi u konačnici reduciralo troškove proizvodnje.

## **1.2. Ciljevi i hipoteza znanstvenog istraživanja**

Cilj rada je definiranje numeričkog modela ortogonalnog rezanja u programu za analizu metodom konačnih elemenata, ABAQUS, koji se temelji na spregnutoj toplinskoj i mehaničkoj analizi. S ciljem stvaranja što pouzdanijeg numeričkog modela, potrebno je fokus postaviti na definiranje pouzdanog zakona očvršćivanja te uvjeta dodira između alata i obratka. Krajnji cilj modela je predviđanje relevantnih parametara za značajke proizvoda kao što su sile rezanja te temperature u zoni rezanja. Navedeno može omogućiti određivanje utjecaja ulaznih parametara na sile rezanja i temperaturu u zoni rezanja te određivanje optimalnih parametara obrade s ciljem smanjenja sila rezanja i temperature u zoni rezanja. Optimizacija parametara obrade klasičnim determinističkim metodama ne daje zadovoljavajuće rezultate zbog širokog područja pretraživanja koje u sebi sadrži mnogobrojna ograničenja. Zbog stohastičke prirode obrade odvajanjem čestica, evolucijski algoritam će se primijeniti za određivanje optimalnih vrijednosti utjecajnih parametara obrade. Njihovo poznavanje osigurava zahtijevanu kvalitetu

proizvoda, smanjenje troškova te povećanje učinkovitosti obrade. Prihvatljivost numeričkog modela će se ocijeniti usporedbom eksperimentalnih i numeričkih rezultata.

Iz navedenog proizlazi znanstvena hipoteza doktorskog istraživanja:

*Konstitutivni model materijala obratka, opis uvjeta dodira između alata i obratka te diskretizacija volumena obratka i alata značajno utječu na rezultate numeričkih simulacija obrade odvajanjem čestica. Numerički model ortogonalnog rezanja temeljen na spregnutoj Euler-Lagrangeovoj formulaciji, koji pretpostavlja generiranje topline zbog trenja i plastičnih deformacija te utjecaj brzine deformacije i temperature na promjenu granice tečenja, omogućit će pouzdano predviđanje sila rezanja i temperature u zoni rezanja.*

*Višeciljnom optimizacijom matematičkih modela koji opisuju utjecaj parametara obrade na izlazne veličine procesa u postupku ortogonalnog rezanja, mogu se odrediti optimalni parametri tako da se minimiziraju sile rezanja i temperatura u zoni rezanja.*

### **1.3. Znanstveni doprinosi rada**

Pregledom dostupne literature povezane s procesom obrade odvajanjem čestica i numeričkim modeliranjem istog, definirano je područje istraživanja. Znanstveni doprinosi doktorske disertacije se očekuju u znanstvenom području tehničkih znanosti, polju strojarstvo, grani proizvodno strojarstvo. Očekivani znanstveni doprinosi se mogu istaknuti u nekoliko sljedećih točaka:

- Na temelju eksperimentalnih rezultata odredit će se optimalni parametri obrade ortogonalnog rezanja aluminijske legure EN AW 6082 T6 s ciljem smanjenja sila rezanja i temperature u zoni rezanja.
- Izradit će se numerički model ortogonalnog rezanja aluminijske legure EN AW 6082 T6 u programu za analizu metodom konačnih elemenata ABAQUS koji se temelji na spregnutoj Euler-Lagrangeovoj formulaciji. Numerički model pretpostavlja generiranje topline zbog trenja i plastičnih deformacija te utjecaj brzine deformacije i temperature na promjenu granice tečenja.
- Na temelju eksperimentalnih i numeričkih rezultata dobit će se saznanja o ponašanju materijala te uvjetima dodira alata i odvojene čestice za aluminijsku leguru EN AW 6082 T6 u uvjetima visokih temperatura i visokih brzina deformacija.

- Predložiti će se dva izraza za zakon očvršćivanja. Izrazi se temelje na izrazu za Johnson-Cookov zakon očvršćivanja i izrazu za Arrheniusov zakon očvršćivanja. U prvom izrazu utjecaj temperature je dodatno opisan logaritamskom funkcijom dok drugi izraz sadržava tangens hiperbolnu funkciju deformacije. Predloženi izrazi implementirat će se u programski paket ABAQUS i ispitati u predviđanju postupka ortogonalnog rezanja aluminijske legure EN AW 6082 T6. Predloženim izrazima ostvarit će se poboljšanja u predviđanju analiziranog postupka.
- Procijenit će se sile rezanja za postupak kosog rezanja (uzdužnog tokarenja) na temelju rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem te transformacijskim modelima. Procijenit će se točnost hibridne metode za aluminijsku leguru EN AW 6082 T6.

Znanstveni doprinosi obuhvaćaju dva važna područja. U eksperimentalnom području, modeliranjem sila rezanja i temperatura u zoni rezanja odredit će se optimalni procesni parametri. Numeričkim modeliranjem će se pokušati opisati stvarno stanje u procesu obrade odvajanjem čestica s ciljem eliminiranja skupih i dugotrajnih eksperimenata.

#### **1.4. Metodologija znanstvenog istraživanja**

S ciljem provjere hipoteze znanstvenog istraživanja te ostvarenja znanstvenih doprinosa nužno je provesti sveobuhvatno istraživanje. Istraživanje obuhvaća eksperimentalna ispitivanja, obradu dobivenih rezultata, teorijska razmatranja, numeričko modeliranje te razvoj i primjenu zakona očvršćivanja.

Pregled literature je za cilj imao utvrđivanje problema, razumijevanje tematike te stvaranje novih perspektiva u području istraživanja obrade odvajanjem čestica. Uočeno je da je modeliranje procesa izrazito složeno. Kako bi se dobili zadovoljavajuće točni izlazni parametri procesa, nužno je proučiti te pravilno definirati brojne numeričke postavke. Za provedbu navedenog, potrebno je paralelno razmatrati eksperimentalne rezultate i rezultate numeričkog modela.

Iako su postupci obrade odvajanjem čestica najčešće trodimenzijski i geometrijski složeni, jednostavniji se slučaj ortogonalnog rezanja primjenjuje za objašnjavanje mehanike odvajanja materijala s obratka. Zbog navedenog, eksperimentalni dio istraživanja obuhvaća provedbu pokusa ortogonalnog rezanja. Da bi se ostvarilo ortogonalno rezanje, tokarenje obratka u obliku

cijevi je provedeno na univerzalnoj tokarilici u Laboratoriju za alatne strojeve na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu. Obrađivani materijal će biti legura aluminija EN AW 6082 T6. Eksperimentalni dio istraživanja, osim validacije rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem, omogućit će i postavljanje matematičkih modela koji opisuju ovisnost izlaznih veličina (sile rezanja i temperatura u zoni rezanja) o parametrima obrade. Za ostvarenje navedenog, primijenit će se metoda matematičkog planiranja pokusa uz mjerenje, obradu i regresijsku analizu rezultata.

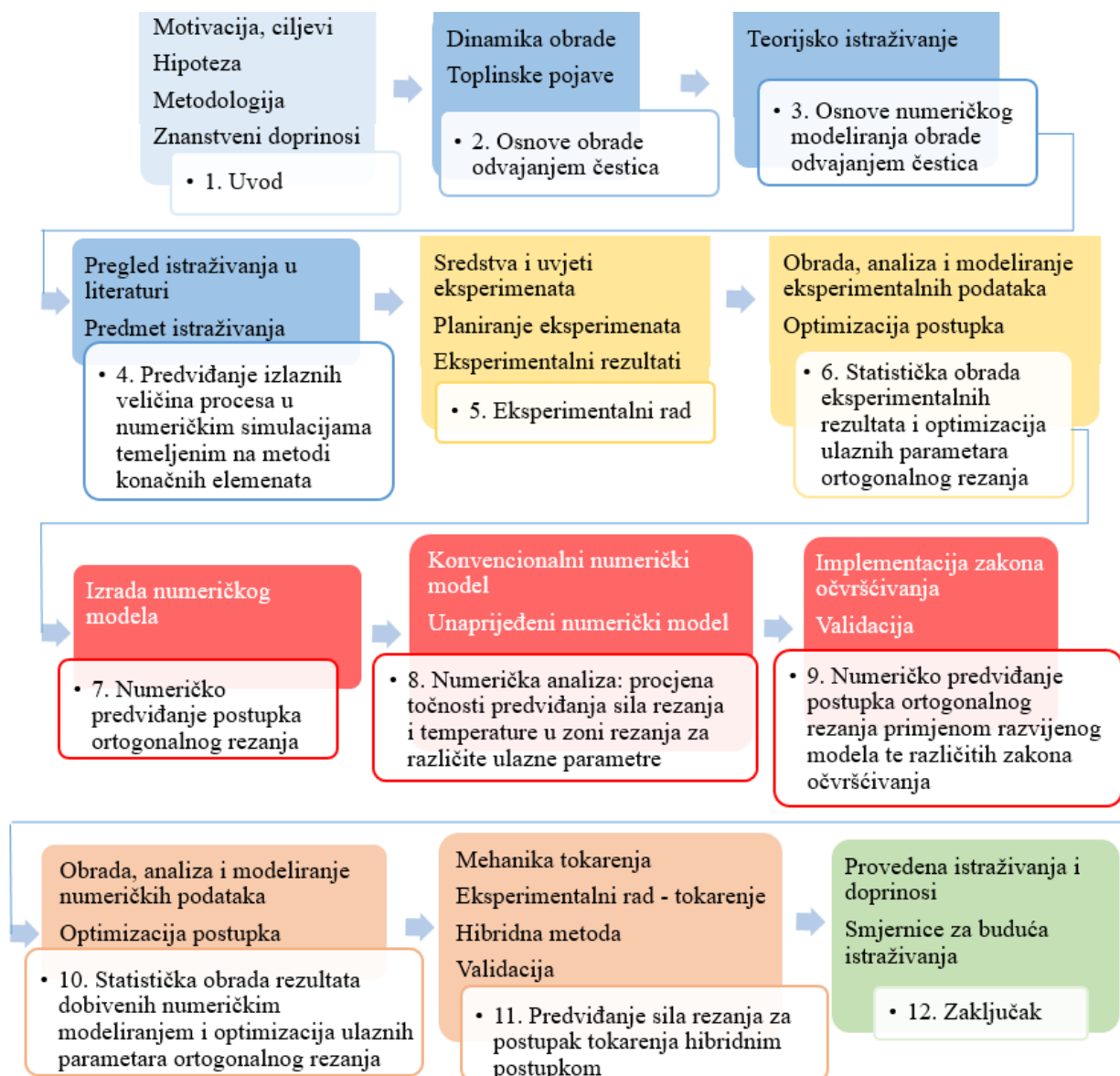
Optimizacija parametara obrade izvest će se uz istovremeno zadovoljenje više funkcija cilja (minimalna glavna sila rezanja, minimalna posmična sila i minimalna temperatura u zoni rezanja). U procesu optimizacije koristit će se genetski algoritam zbog njegove primjenjivosti na kontinuirane, diskretne i mješovite varijable te na probleme višeciljne optimizacije.

Teorijska istraživanja će omogućiti definiranje odgovarajućih ulaznih parametara te numeričkih postavki za simuliranje procesa. Numerička analiza ortogonalnog rezanja EN AW 6082 T6 legure provest će se u računalnom programu ABAQUS/Explicit. U početnoj fazi istraživanja cilj je utvrditi odgovarajuće ulazne parametre te numeričke postavke, definiranje najprikladnijih koeficijenata Johnson-Cookovog (JC) zakona očvršćivanja i definiranje optimalne veličine konačnog elementa. U sljedećoj fazi numeričkog istraživanja cilj je procijeniti točnost predviđanja sila rezanja i temperatura u zoni rezanja za različite ulazne parametre. S ciljem razmatranja najčešće primjenjivanih zakona očvršćivanja, program za analizu metodom konačnih elemenata ABAQUS će se povezati s potprogramom napisanom u programskom jeziku FORTRAN. Odnosno, u računalni program za analizu metodom konačnih elemenata implementirat će se različiti zakoni očvršćivanja. Usporedbom eksperimentalnih i rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem dat će se ocjena numeričkih modela.

Nakon definiranja pouzdanih numeričkih modela, rezultati istih će se upotrijebiti za optimizaciju parametara obrade. Rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem će se primijeniti u hibridnoj metodi s ciljem predviđanja sile rezanja za postupak tokarenja. S ciljem validacije predviđene sile rezanja hibridnom metodom, provest će se drugi dio eksperimentalnih istraživanja koji obuhvaća mjerenje sila u postupku tokarenja.

## 1.5. Struktura rada

Disertacija je organizirana u dvanaest poglavlja, Slika 1.1. U prvom poglavlju istaknuti su motivacija, ciljevi i hipoteza rada. Predstavljena je metodologija te znanstveni doprinosi istraživanja. U drugom poglavlju opisane su temeljne značajke obrade odvajanjem čestica te je istaknuta dinamika obrade i toplinske pojave koje se javljaju prilikom obrade odvajanjem čestica. U trećem poglavlju predstavljeno je teorijsko istraživanje za odabrano područje disertacije te su opisane osnove numeričkog modeliranja procesa. U četvrtom poglavlju predstavljen je pregled dosadašnjih istraživanja u literaturi za odabrano područje doktorskog rada. Poglavlje obuhvaća i predviđanje izlaznih veličina procesa u numeričkim simulacijama temeljenim na metodi konačnih elemenata. Fokus je stavljen na predviđanje sila rezanja te temperaturu u zoni rezanja. Također, detaljno su analizirana istraživanja gdje se primijenila spregnuta Euler-Lagrangeova formulacija u numeričkim modelima. Identificirani su neistraženi problemi u području znanstvenog istraživanja. U petom poglavlju predstavljen je eksperimentalni dio rada vezan uz ortogonalno rezanje aluminijske legure EN AW 6082 T6. Opisani su sredstva i uvjeti eksperimenata te rezultati eksperimentalnih istraživanja. Obrada, analiza i modeliranje eksperimentalnih podataka su predstavljeni u šestom poglavlju. Također je opisana i primjena evolucijskog algoritma s ciljem optimizacije ortogonalnog rezanja. U sedmom poglavlju prikazan je numerički model ortogonalnog rezanja. Istaknuti su problemi i preduvjeti koje je potrebno ispuniti za simuliranje procesa nastajanja odvojene čestice. Na temelju eksperimentalnih rezultata provedena je validacija numeričkih modela. U osmom poglavlju je provedena numerička analiza s ciljem procjene točnosti predviđanja sila rezanja i temperature u zoni rezanja za različite ulazne parametre. U devetom poglavlju su primijenjeni različiti zakoni očvršćivanja. Na temelju eksperimentalnih rezultata predstavljenih u petom poglavlju, provedena je i validacija numeričkih modela u kojima su primijenjeni različiti zakoni očvršćivanja. Obrada, analiza i modeliranje rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem su predstavljeni u desetom poglavlju. Također je opisana i primjena evolucijskog algoritma s ciljem optimizacije ortogonalnog rezanja na temelju numeričkih podataka. U jedanaestom poglavlju je predstavljeno predviđanje sila rezanja za postupak tokarenja hibridnom metodom. Posljednje, dvanaesto poglavlje sadrži zaključke provedenog istraživanja te smjernice za buduća istraživanja.



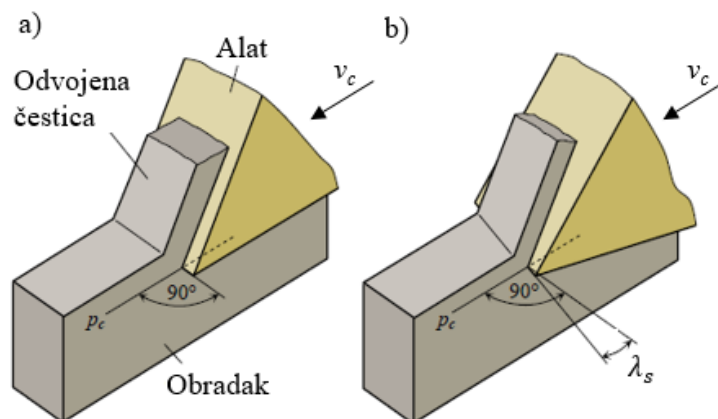
Slika 1.1. Struktura disertacije



## 2. OSNOVE OBRADJE ODVAJANJEM ČESTICA

### 2.1. Dinamika procesa odvajanja čestica

Proces odvajanja čestica nastaje prodiranjem reznog klina alata brzinom rezanja u materijal predmeta obrade. Produranjem reznog klina alata odnosno, djelovanjem vanjske sile dolazi do pretvaranja viška materijala predmeta obrade u odvojenu česticu. Postupci obrade odvajanjem čestica definirani su vrstama i oblicima alata, oblicima obratka te vrstama i kombinacijama gibanja alata i obratka. Ortogonalno (dvodimenzijско) rezanje i koso (trodimenzijско) rezanje su dvije vrste rezanja obzirom na kut između glavne oštrice alata i pravca glavne brzine rezanja. Ortogonalno rezanje predstavlja poseban slučaj rezanja kod kojeg je glavna oštrica alata postavljena pod kutom od  $90^\circ$  u odnosu na pravac brzine rezanja,  $p_c$ . Koso rezanje predstavlja opći slučaj rezanja kod kojeg je glavna oštrica alata postavljena pod nekim kutom različitim od  $90^\circ$  u odnosu na pravac brzine rezanja, Slika 2.1. ( $\lambda_s$  - kut nagiba glavne oštrice alata).



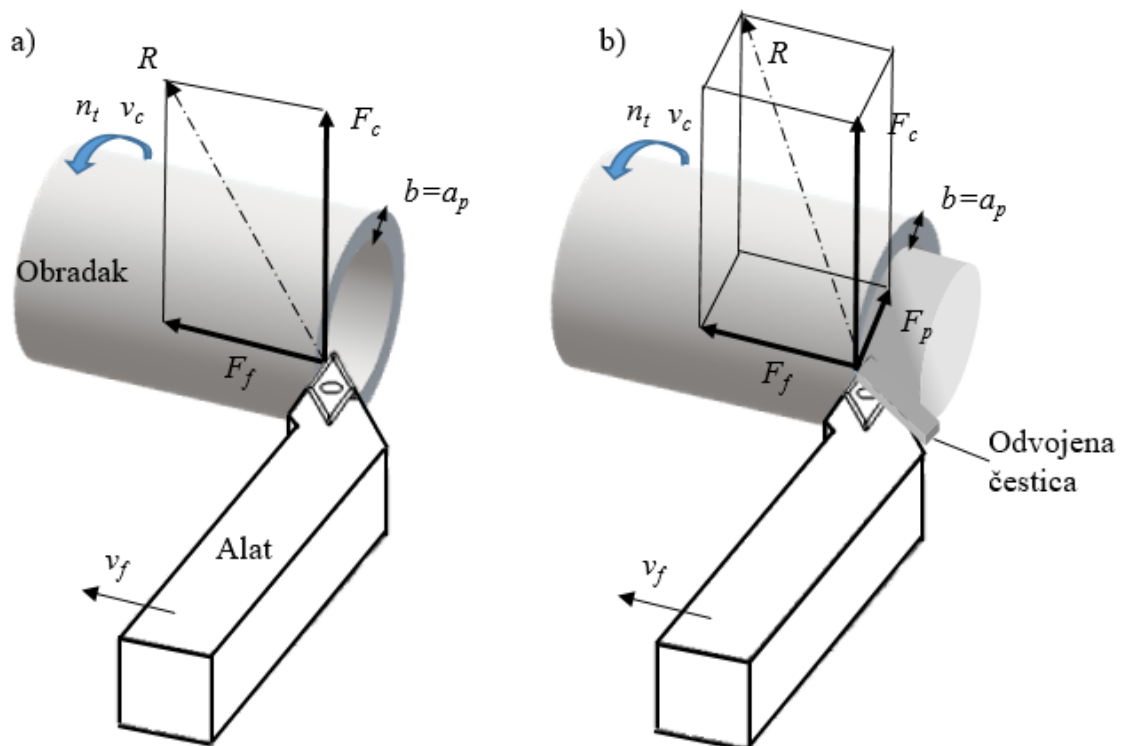
Slika 2.1. Vrste rezanja: a) ortogonalno (dvodimenzijско), b) koso (trodimenzijско) [2]

Ravninsko stanje deformacija u području dodira alata i obratka ostvaruje se uz sljedeće pretpostavke [3], [5]:

- glavna oštrica alata je šira od širine obratka (širine obrade)
- nema trenja na stražnjoj površini alata
- smicanje se odvija u ravnini
- nema deformacije odvojene čestice na pravcu širine
- prilikom obrada ne nastaje naljepak

- brzina rezanja, dubina rezanja i posmak su konstantne veličine
- površina poprečnog presjeka odvojene čestice je nepromjenjiva.

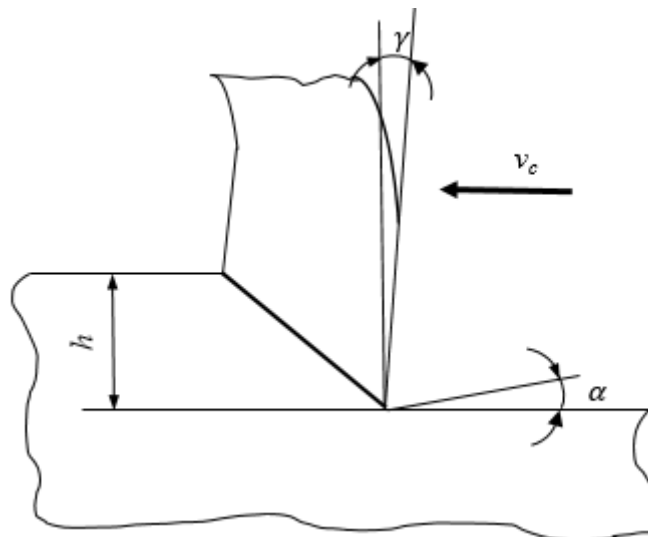
Sile potrebne za stvaranje odvojene čestice za slučaj ortogonalnog i kosog rezanja su prikazane na Slici 2.2. Prikazane sile u zoni rezanja nastaju uslijed otpora materijala obratka. Tipičan primjer ortogonalnog rezanja je uzdužno tokarenje cijevi, gdje je dubina rezanja jednaka debljini stijenke cijevi, a kut namještanja glavne oštrice alata  $\kappa_r = 90^\circ$ .



Slika 2.2. Usporedba ortogonalnog i kosog rezanja: a) mehanika ortogonalnog rezanja, b) mehanika kosog rezanja

Kod ortogonalnog rezanja cijevi, širina rezanja, tj. širina neodrezane odvojene čestice ( $b$ ), jednaka je debljini stijenke cijevi, tj. dubini rezanja ( $a_p$ ). Debljina neodrezane odvojene čestice ( $h$ ) jednaka je posmaku po okretaju obratka ( $f$ ). Na Slici 2.2.a) sila rezanja  $R$  je rezultanta glavne sile rezanja  $F_c$  i posmične sile  $F_f$ . Glavna sila rezanja djeluje u pravcu brzine rezanja  $v_c$ . Posmična sila djeluje u smjeru posmične brzine  $v_f$  i okomita je na glavnu silu rezanja. U slučaju kosog rezanja (npr. tokarenja), Slici 2.2.b), postoji treća komponenta sile rezanja  $R$  koja se naziva sila prodiranja  $F_p$  te djeluje u pravcu zauzete dubine rezanja.

U slučaju dvodimenzijskog modela stvaranja odvojene čestice mogu se jednostavnije ispitati utjecaji elemenata geometrije alata, interakcije koje se pojavljuju između alata i odvojene čestice i sl. [2]. Geometrija ortogonalnog modela je prikazana na Slici 2.3. Geometrija alata je definirana pomoću prednjeg kuta ( $\gamma$ ) i stražnjeg kuta ( $\alpha$ ).



Slika 2.3. Geometrija ortogonalnog modela

Tokarenje je najčešći postupak obrade metala odvajanjem čestica. Primjenjuje se za obradu cilindričnih obradaka jednoreznim alatom pri čemu je moguće obrađivati cilindrične (uzdužne) i čeone (poprečne) površine obratka. Posmično gibanje je paralelno osi obratka pri uzdužnom tokarenju, a pri poprečnom tokarenju, posmično gibanje je radijalno i okomito na os obratka. Brzina rezanja  $v_c$  (m/min), za postupak tokarenja, se računa prema izrazu:

$$v_c = \frac{D\pi n_t}{1000} \quad (2.1.)$$

gdje je:

$D$  - promjer obratka

$n_t$  - frekvencija vrtnje glavnog vretena.

Koeficijent sabijanja (stupanj kompresije) odvojene čestice jednak je omjeru debljine odvojene čestice ( $h_1$ ) i debljine neodrezane odvojene čestice ( $h$ ):

$$\xi = \frac{h_1}{h} \quad (2.2.)$$

Koeficijent uzdužnog sabijanja odvojene čestice se računa:

$$\xi_l = \frac{l_1}{l} \quad (2.3.)$$

gdje je:

$l_1$  - duljina odvojene čestice

$l$  - duljina puta oštrice alata.

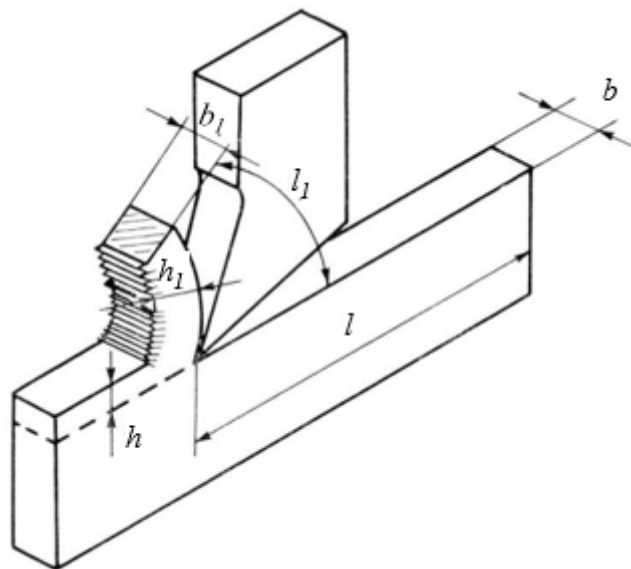
Koeficijent sabijanja odvojene čestice u smjeru širine (Slika 2.4.) se računa:

$$\xi_b = \frac{b_1}{b} \quad (2.4.)$$

gdje je:

$b$  - širina rezanja

$b_1$  - širina odvojene čestice.

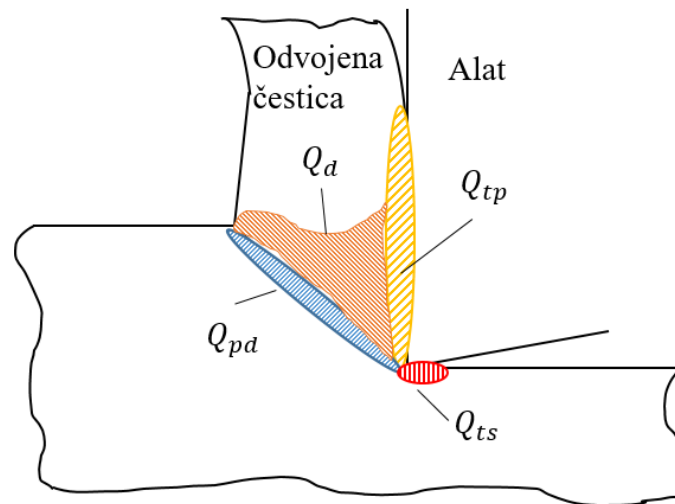


Slika 2.4. Prikaz karakterističnih dimenzija za određivanje koeficijenta sabijanja odvojene čestice [3]

## 2.2. Toplinske pojave pri obradi odvajanjem čestica

Ukupna snaga utrošena na odvajanje čestica najvećim dijelom se pretvara u toplinu. U prosjeku se do 97 % snage pretvori u toplinu [3]. Povećanjem temperature dolazi do gubitka tvrdoće i čvrstoće materijala alata. To utječe na postojanost alata te dovodi do gubitka reznih sposobnosti

alata. Također, s povećanjem temperature mijenjaju se sile rezanja, zaostala naprezanja u materijalu, itd. Najveća količina topline se razvija u zoni najvećih deformacija tj. u ravni smicanja,  $Q_d$ , (od 75 % do 80 % ukupne topline) te na prednjoj površini reznog alata,  $Q_{tp}$ , (od 19 % do 22,5 % ukupne topline) koja je u dodiru s odvojenom česticom. U zoni najvećih deformacija dolazi do plastične deformacije i razaranja materijala obratka, a na dodiru prednje površine alata i obratka se razvija toplina zbog trenja. Zbog toga se tim zonama, u analizama obrade odvajanjem čestica, posvećuje najveća pažnja [6]. Ostali izvori topline nastaju zbog trenja na stražnjoj površini alata,  $Q_{ts}$ , (od 2 % do 3,5 % ukupne topline) te zbog plastičnih deformacija neposredno ispred ravni smicanja,  $Q_{pd}$ , (0,5 % ukupne topline), Slika 2.5.



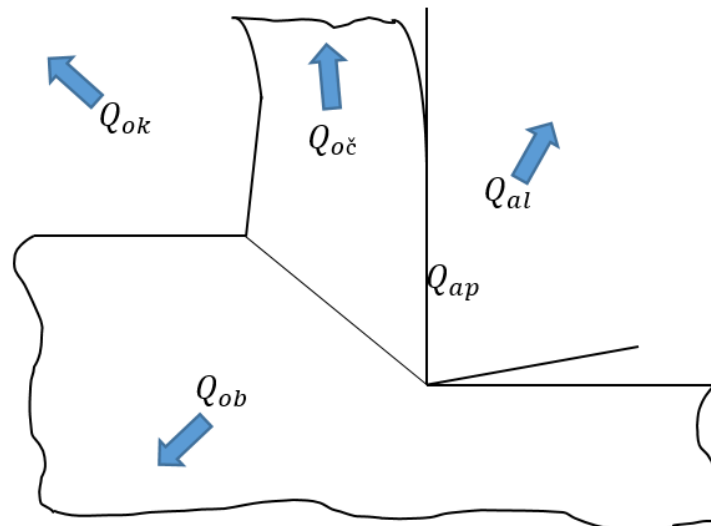
Slika 2.5 Shematski prikaz toplinskih izvora pri obradi odvajanjem čestica

Ukupna toplina se može odrediti sumiranjem toplina iz svih izvora:

$$Q = \sum Q_{izvori} = Q_d + Q_{tp} + Q_{ts} + Q_{pd} \quad (2.5.)$$

Generirana toplina nastala pri obradi odvajanjem čestica dovodi do zagrijavanja obratka, alata, odvojene čestice i okoline. Još jedan karakteristični toplinski ponor je na području prednje i stražnje površine alata gdje se dio topline troši na lokalno zagrijavanje tankog sloja materijala alata, Slika 2.6. Udio topline koji će u određenim uvjetima biti odveden odvojenom česticom, obratkom i alatom u najvećoj mjeri ovisi o brzini rezanja [7]. Nedić i Lazić navode sljedeće relativne odnose količine topline [3], [6]:

- $Q_{oč} = (68 \% - 80 \%) Q$  – odvojena čestica odvede veći dio topline generirane u zoni smicanja ( $Q_d$ ) te dio topline generirane na prednjoj površini alata ( $Q_{tp}$ )
- $Q_{ok} = (8 \% - 25 \%) Q$  – u okolinu odlazi dio ukupne topline
- $Q_{ob} = (2 \% - 10 \%) Q$  – u obradak odlazi toplina generirana zbog plastičnih deformacija neposredno ispred ravnine smicanja ( $Q_{pd}$ ) te dio topline generirane u zoni smicanja ( $Q_d$ ) i dio topline nastale zbog trenja na stražnjoj površini alata ( $Q_{ts}$ )
- $Q_{al} = (2 \% - 5 \%) Q$  – u alat odlazi dio topline generirane na prednjoj površini alata ( $Q_{tp}$ ) i dio topline nastale zbog trenja na stražnjoj površini alata ( $Q_{ts}$ )
- $Q_{ap} = (1 \% - 6 \%) Q$  – dio ukupne topline uzrokuje lokalno zagrijavanje tankog sloja materijala alata.



Slika 2.6. Shematski prikaz toplinskih ponora pri obradi odvajanjem čestica

U obradi odvajanjem čestica, prijenos topline s toplog područja na hladno odnosno iz toplinskih izvora u toplinske ponore se odvija kondukcijom i konvekcijom.

Toplinsko vođenje ili kondukcija se odvija na područjima dodira alata i odvojene čestice odnosno dolazi do prijelaza topline iz zona viših temperatura (odvojena čestica) u alat gdje su niže temperature. Prijenos topline kondukcijom se može izraziti:

$$q = \lambda \nabla T \quad (2.6.)$$

gdje je:

$q$  - gustoća toplinskog toka

$\lambda$  - koeficijent toplinske vodljivosti

$\nabla T$  - temperaturni gradijent koji uzima u obzir razliku temperature alata i odvojene čestice u području njihovog dodira.

Zbog nedostatka eksperimentalnih podataka i jednostavnosti, koeficijent toplinske vodljivosti se uzima kao konstantna vrijednost.

Strujanje topline ili konvekcija se odvija između obratka i okoline. Gustoća toplinskog toka kod konvekcije definirana je:

$$q = \alpha'(T_{ob} - T_0) \quad (2.7.)$$

gdje je:

$q$  - gustoća toplinskog toka

$\alpha'$  - koeficijent prijelaza topline

$T_{ob}$  - temperatura obratka

$T_0$  - temperatura okoline (sobna temperatura).

U većini simulacija obrade odvajanjem čestica razmatrano vrijeme je kratko pa se prijelaz topline konvekcijom u većini slučajeva zanemaruje.

U metalima, uslijed plastičnih deformacija odnosno plastičnog rada dolazi do disipacije mehaničke energije. Dio energije se pretvara u toplinu, ali od 5 % do 15 % energije se pohranjuje u tijelo [8]. Ta energija koja se pohranjuje u tijelo se zove latentna energija hladnog rada. Zbog toga se, u obradama gdje dolazi do velikih plastičnih deformacija, uvodi Taylor-Quinney koeficijent,  $\eta_p$ . Koeficijent  $\eta_p$  predstavlja udio topline nastale zbog plastičnih deformacija (engl. inelastic heat fraction) te je najčešće njegova vrijednost za metale od 0,85 do 0,95 [9], [10]. Gustoća toplinskog toka (po jediničnom volumenu) zbog plastičnih deformacija je jednaka [11]:

$$q = \eta_p \bar{\sigma} \dot{\epsilon}_p \quad (2.8.)$$

gdje je:

$q$  - gustoća toplinskog toka po jediničnom volumenu

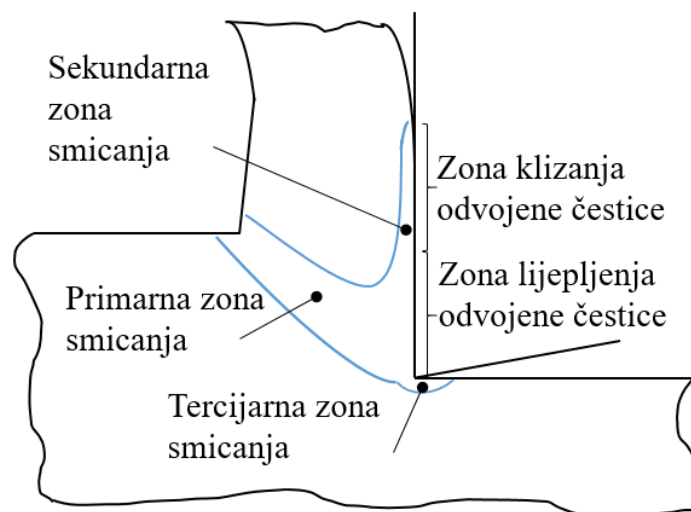
$\eta_p$  - Taylor-Quinney koeficijent

$\bar{\sigma}$  – ekvivalentno naprežanje

$\dot{\epsilon}_p$  - brzina ekvivalentne plastične deformacije.

U području obrade odvajanjem čestica, često se promatra srednja temperatura rezanja koja predstavlja prosječnu vrijednost između temperatura na dodirnim površinama alata, odvojene čestice i obratka. Na srednju temperaturu utječe niz faktora. Povećanjem brzine rezanja, posmaka i dubine rezanja raste i temperatura. Najutjecajniji parametri obrade na temperaturu su brzina rezanja te posmak. Kao što se može primijetiti i u jednadžbama (2.5) i (2.6) materijal alata i obratka također utječu na temperaturu rezanja. Na temperaturu rezanja utječe i geometrija reznog alata jer se njenom promjenom mijenjaju i veličine plastične deformacije u zoni smicanja, sila trenja te specifična sila rezanja. Ali, utjecaj geometrije alata je manji u odnosu na parametre obrade te u odnosu na materijale alata i obratka.

Za proces stvaranja odvojene čestice su karakteristične tri zone plastične deformacije gdje je glavni mehanizam smicanje. Zbog toga se ta područja obično nazivaju primarnom, sekundarnom i tercijarnom zonom smicanja, Slika 2.7.



Slika 2.7. Zone plastičnih deformacija za proces stvaranja odvojene čestice

U primarnoj zoni nastaju velike smične deformacije koje su posljedica savijanja obratka u smjeru prednje površine alata. U sekundarnoj zoni smicanja dolazi do dodatne plastične deformacije tankog sloja unutarnje strane odvojene čestice kao posljedica trenja na prednjoj površini alata. Tercijarna zona smicanja je izravna posljedica zaobljenosti rezne oštrice ili prisutnosti naljepka. Naljepak je slojevita nakupina otvrdnutih čestica materijala obratka na prednjoj površini reznog alata koja se ciklički formira lokalnim zavarivanjem, a vrlo brzo nakon formiranja, naljepak postaje nestabilan i razara se [3].



Može se zaključiti da zbog velikih plastičnih deformacija materijala te triboloških uvjeta koji se javljaju na dodiru alata i obratka proces odvajanja čestica je jedan od najsloženijih proizvodnih procesa. To utječe i na složenost modeliranja samog procesa. U nastavku su navedene neke od poteškoća u modeliranju obrade odvajanjem čestica.

Obrada se odvija u uvjetima velike plastične deformacije, visoke brzine deformacije i visoke temperature. Zakon očvršćivanja materijala obratka bi trebao ispravno opisivati spomenute uvjete.

Trenje između prednje površine alata i odvojene čestice je vrlo veliko. Potrebno je ispravno definirati vrijednost koeficijenta trenja kao i ispravni model za opis trenja.

Obzirom da prilikom dodira reznog klina alata i obratka dolazi do uklanjanja materijala obratka u obliku odvojene čestice, postoje različite metode za opisivanje loma za žilave i krhke materijale obratka koje ovise o uvjetima procesa.

U sljedećem poglavlju su predstavljeni glavni pristupi i tehnike koje se koriste u numeričkom modeliranju procesa odvajanja čestica.

### 3. OSNOVNE POSTAVKE NUMERIČKOG MODELA OBRADE ODVAJANJEM ČESTICA

Numeričke simulacije se koriste u predviđanju izlaznih karakteristika obrade odvajanjem čestica jer se različite fizičke pojave koje se javljaju teško mogu opisati analitičkim pristupima. Eksperimentalna istraživanja su skupa i zahtijevaju mnogo vremena. Modeliranje procesa odvajanja čestica može se temeljiti na MKE ili bezmrežnoj metodi. Bezmrežna metoda je primjenjiva za velike deformacije, ali se rijetko koristi za numeričko modeliranje procesa obrade odvajanjem čestica zbog dugog vremena potrebnog za provedbu simulacije kao i manje točnosti u odnosu na metodu temeljenu na MKE [12]. Primjenom metode konačnih elemenata moguće je predvidjeti različite izlazne veličine procesa kao što su sile rezanja, temperature, raspodjela naprezanja, geometrija odvojene čestice, itd. Također, u relativno kratkom periodu moguće je analizirati veliki broj numeričkih rezultata što omogućuje uštedu na vremenu, materijalu i novcu. Zbog navedenog, MKE postaje najčešće korištena metoda u numeričkoj analizi procesa odvajanja čestica u posljednja dva desetljeća [7].

Temelj metode konačnih elemenata je diskretizacija kontinuuma na odgovarajući broj podkontinuuma odnosno konačnih elemenata (engl. finite elements) međusobno povezanih pomoću čvorova u mrežu. Za svaki konačni element postavljaju se jednačbe koje opisuju stanje (pomaci, deformacije, temperatura, naprezanja, itd.) u svakom elementu. Određenim transformacijama, stanja se mogu odrediti za cijeli model. Kao rezultat dobiju se odgovarajuće veličine koje ovise o vrsti problema koji se rješava.

U postupcima obrade odvajanjem čestica se zahtijevana geometrija izratka postiže uklanjanjem viška materijala u obliku odvojene čestice. Vanjske sile potrebne za odvajanje materijala uzrokuju unutarnje sile. Unutarnje sile uzrokuju naprezanja, a ona deformaciju. Potrebno je odrediti raspodjelu naprezanja i deformacija nastala uslijed djelovanja vanjskih sila.

Da bi se odredilo ravnotežno stanje tijela koje odgovara opterećenju koje je u funkciji vremena, primjenjuju se metode vremenske integracije. Ove metode diskretiziraju vremensku domenu u konačan broj intervala odnosno koraka. Način na koji se određuju nepoznate veličine na početku odnosno na kraju svakog koraka ovisi o odabiru metode vremenske integracije. U programskim paketima koji se temelje na MKE općenito se koriste različite implicitne i eksplicitne metode vremenske integracije. Eksplicitne metode za određivanje nepoznatih veličina u vremenu  $t+\Delta t$  koriste poznate veličine i njihove derivacije u vremenu  $t$  ( $\Delta t$

predstavlja prirast vremena). Prirast vremena mora biti dovoljno male veličine kako bi analiza bila stabilna odnosno kako bi rezultati bili prihvatljivi. Zbog navedenog, prirast vremena kod eksplicitnih postupaka je manji u usporedbi s prirastom vremena kod implicitnih postupaka. Implicitne metode za određivanje nepoznatih veličina u vremenu  $t+\Delta t$  koriste poznate veličine koje odgovaraju vremenskom trenutku  $t$  i nepoznate veličine koje odgovaraju vremenskom trenutku  $t+\Delta t$ . Kod implicitnih metoda (u odnosu na eksplicitne metode) primjenjuje se iterativni postupak kako bi se postiglo ravnotežno stanje tijela koje odgovara narinutom opterećenju. Zadana točnost rješenja je unaprijed određena. Iako su implicitne metode općenito nešto preciznija u usporedbi s eksplicitnim metodama, kod pojave trenja i dodira, konvergencija rezultata ne mora se ni postići [13].

### 3.1. Elasto-viskoplastičnih konstitutivni model pri povišenim temperaturama

U tijelu nastaju naprezanja pod djelovanjem opterećenja odnosno vanjskih sila. Ako se tijelo nakon prestanka djelovanja opterećenja vrati u početni oblik deformacija je elastična, u protivnom u tijelu se javljaju i trajne plastične deformacije.

U slučaju plastičnih deformacija za određivanje stanja naprezanja potrebno je poznavati i stanje deformacije i povijest opterećivanja. Teorija plastičnosti se primjenjuje ako brzina deformacije ne utječe na ponašanje materijala. Međutim, kada brzina deformacije značajno utječe na ponašanje materijala kao za proces odvajanja čestica, prikladno je koristiti teoriju viskoplastičnosti.

Konstitutivne jednadžbe predstavljaju zakone kojima se opisuje ponašanje materijala uslijed opterećenja. Osnovni elementi elasto-plastičnog konstitutivnog modela su:

- 1) uvjet tečenja koji određuje granicu elastičnih i plastičnih stanja u prostoru naprezanja
- 2) zakon očvršćivanja kojim se opisuje promjena uvjeta tečenja s napredovanjem plastične deformacije. Za razmatrani proces, zakon očvršćivanja bi trebao opisati i utjecaj brzine deformacije te promjenu temperature na promjenu uvjeta tečenja.
- 3) pravilo tečenja kojim se postavlja odnos između naprezanja i brzine plastične deformacije.

U nastavku su prikazane osnovne postavke elasto-viskoplastičnog modela pri povišenim temperaturama u uvjetima malih deformacija koje se mogu preslikati za uvjete velikih deformacija [14]–[16].

Invarijante tenzora naprezanja ( $J_1, J_2, J_3$ ) su funkcije komponenti tenzora naprezanja ( $\sigma_{ij}$ ) koje se ne mijenjaju pri rotaciji koordinatnog sustava, a glase:

$$J_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} \quad (3.1.)$$

$$J_2 = \sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{xx}\sigma_{zz} - \sigma_{xy}^2 - \sigma_{xz}^2 - \sigma_{yz}^2 \quad (3.2.)$$

$$J_3 = \det[\sigma_{ij}] \quad (3.3.)$$

Razlaganjem tenzora naprezanja na devijatorski dio, koji uzrokuje promjenu oblika, i sferni dio, koji uzrokuje promjenu obujma, dobije se:

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} - \sigma_0 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} - \sigma_0 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} - \sigma_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{bmatrix} \quad (3.4.)$$

odnosno:

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + \sigma_0 \delta_{ij} \quad (3.5.)$$

gdje je:

$s_{ij}$  - komponenta devijatorskog dijela tenzora naprezanja

$\sigma_0$  - srednje normalno naprezanje

$\delta_{ij}$  - Kroneckerov simbol ( $\delta_{ij} = 0$  za  $i \neq j$ , a  $\delta_{ij} = 1$  za  $i = j$ ).

Srednje normalno naprezanje uzrokuje promjenu obujma te se računa prema izrazu:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} = \frac{\sigma_{kk}}{3} \quad (3.6.)$$

Invarijante devijatorskog tenzora naprezanja glase:

$$J'_1 = s_{xx} + s_{yy} + s_{zz} = 0 \quad (3.7.)$$

$$J'_2 = s_{xx}s_{yy} + s_{yy}s_{zz} + s_{xx}s_{zz} - s_{xy}^2 - s_{xz}^2 - s_{yz}^2 \quad (3.8.)$$

$$J'_3 = \det[s_{ij}] \quad (3.9.)$$

Razlaganjem deformacije ( $\varepsilon_{ij}$ ) na sfernu deformaciju i devijatorsku deformaciju ( $e_{ij}$ ) dobije se:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_0 \delta_{ij} + e_{ij} \quad (3.10.)$$

gdje je:

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_{kk}}{3}, \quad e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{\varepsilon_{kk}}{3} \delta_{ij} \quad (3.11.)$$

Obzirom da u plastičnom području odnos naprezanje – deformacija ovisi o povijesti opterećivanja (različita stanja naprezanja mogu odgovarati istoj deformaciji), izraz naprezanje – deformacija se zapisuje u inkrementalnom obliku. U ovom doktorskom radu primijenjena je Eulerova formulacija kako bi se fiksirala domena obratka u prostoru. Drugim riječima mreža konačnih elemenata nije vezana za obradak nego je fiksirana u prostoru. U ovakvoj formulaciji se promatra deformacija cijelog kontrolnog volumena. To se postiže promatranjem brzine deformacije. Tenzor brzine deformacije se može zapisati [14]:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\mathbf{v}\nabla + \nabla\mathbf{v}) \quad (3.12.)$$

gdje tenzor gradijenta brzine  $\mathbf{v}\nabla$  sadržava derivacije brzine  $\mathbf{v}$  po prostornim koordinatama. Prethodni izraz se može napisati preko komponenti tenzora:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (3.13.)$$

Prilikom plastičnog deformiranja, elastični i neelastični odgovori se mogu prikazati aditivnim rastavljanjem brzine deformacije ( $\dot{\varepsilon}_{ij}$ ) na povratnu elastičnu komponentu ( $\dot{\varepsilon}_{e,ij}$ ) i nepovratnu plastičnu komponentu ( $\dot{\varepsilon}_{p,ij}$ ). Navedeno vrijedi u slučaju malih deformacija. Dakle vrijedi:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{e,ij} + \dot{\varepsilon}_{p,ij} \quad (3.14.)$$

Ako je deformiranje elastično, naprezanje se može odrediti deriviranjem funkcije gustoće energije deformacije po deformaciji:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}} \quad (3.15.)$$

Za slučaj malih linearnih elastičnih deformacija te konstantne temperature, odnos komponenti naprezanja  $\sigma_{ij}$  i komponenti deformacije  $\varepsilon_{kl}$  u elastičnom području definira se Hookeovim zakonom koji za troosno stanje naprezanja glasi:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (3.16.)$$

gdje je  $C_{ijkl}$  komponenta tenzora elastičnosti.

Tenzor elastičnosti definira se konstantama elastičnosti: Youngov modul elastičnosti  $E$ , Poissonov koeficijent  $\nu$ , modul smicanja  $G$  te obujamni modul elastičnosti  $K$ . Hookeov zakon može se zapisati korištenjem Lamiovih konstanti elastičnosti  $\mu$  i  $\lambda'$  koje izražene preko  $E$  i  $\nu$  glase:

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.17.)$$

$$\lambda' = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (3.18.)$$

Hookeov zakon za izotropne linearno elastične materijale zapisan preko Lamiovih konstanti glasi:

$$\sigma_{ij} = \lambda' \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (3.19.)$$

$$\varepsilon_{e,ij} = \frac{1}{2\mu} \left( \sigma_{ij} - \frac{\lambda'}{3\lambda' + 2\mu} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (3.20.)$$

Hookeov zakon može se zapisati razlaganjem na dio gdje su povezana devijatorska naprezanja i devijatorske deformacije i na dio u kojemu su povezani sferni dijelovi naprezanja i deformacije te glasi:

$$\sigma_{kk} = (3\lambda' + 2\mu)\varepsilon_{kk} \quad (3.21.)$$

$$s_{ij} = 2\mu e_{ij} \quad (3.22.)$$

Obzirom da vrijedi:

$$d\varepsilon_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}dt \quad (3.23.)$$

veza između brzine elastične deformacije i naprezanja za sferni i devijatorski dio se može zapisati:

$$d\varepsilon_{e,kk} = \frac{d\sigma_{kk}}{(3\lambda' + 2\mu)}, \quad \dot{\varepsilon}_{e,kk}dt = \frac{\dot{\sigma}_{kk}}{(3\lambda' + 2\mu)}dt \quad (3.24.)$$

$$de_{e,ij} = \frac{ds_{ij}}{2\mu}, \quad \dot{e}_{e,ij}dt = \frac{\dot{s}_{ij}}{2\mu}dt \quad (3.25.)$$

gdje je  $\dot{\sigma}_{kk}$  vremenska derivacija  $\sigma_{kk}$  i  $\dot{s}_{ij}$  vremenska derivacija  $s_{ij}$ .

Kad osim mehaničkih djeluju i toplinska opterećenja, Hookeov zakon je potrebno preformulirati. Uvodi se koeficijent toplinskog širenja  $\alpha_T$ . Za izotropne materijale vrijedi sljedeći izraz [14]:

$$\sigma_{ij} = \lambda'\delta_{ij}\varepsilon_{kk} + 2\mu\varepsilon_{ij} - (3\lambda' + 2\mu)\alpha_T\Delta T\delta_{ij} \quad (3.26.)$$

gdje je  $\Delta T$  promjena temperature.

Kod jednoosnog stanja naprezanja plastična deformacija nastaje kada stvarno naprezanje  $\sigma$  dosegne iznos inicijalnog naprezanja plastičnog tečenja  $\sigma_T$ . Kod višeosnog stanja naprezanja nastanak plastične deformacije ovisi o iznosima komponenti naprezanja i njihovim odnosima. Ako se radi o plastično očvršćujućem materijalu, povećanje iznosa plastične deformacije nakon postizanja inicijalne granice tečenja materijala moguće je samo uz povećanje iznosa naprezanja.

Kod jednoosnog stanja naprezanja, uvjet tečenja jednostavno se definira uspoređivanjem naprezanja u materijalu s granicom tečenja materijala  $\sigma_T$  koja se mijenja prema zakonu očvršćivanja. Kod dvoosnog, odnosno troosnog stanja naprezanja, stanje naprezanja svodi se na jednu veličinu tzv. ekvivalentno naprezanje koje se uspoređuje s naprezanjem tečenja koje se mijenja prema zakonu očvršćivanja. Ekvivalentno naprezanje određuje se prema različitim teorijama čiji je konačan rezultat tzv. funkcija tečenja  $f_y$ .

Za elastično područje vrijedi uvjet:

$$f_y(\sigma_{ij}, T, H_\delta) < 0 \quad (3.27.)$$

gdje je:

$T$  - temperatura

$H_\delta$  - parametri očvršćivanja.

Za stanja naprezanja za koja nastaju plastične deformacije vrijedi:

$$f_y(\sigma, T, H_\delta) = 0 \quad (3.28.)$$

Geometrijski prikaz uvjeta tečenja u prostoru naprezanja jest ploha tečenja. U općem slučaju, zbog očvršćivanja, ploha tečenja može mijenjati svoju veličinu, oblik i položaj. Modeli očvršćivanja opisuju promjenu uvjeta tečenja s napredovanjem plastične deformacije od kojih je najjednostavniji model izotropnog očvršćivanja. Prema izotropnom modelu očvršćivanja pretpostavlja se da se ploha tečenja jednoliko širi u prostoru naprezanja. Izotropno očvršćivanje se primjenjuje za modele gdje se Bauschingerov efekt zanemaruje (smanjenje granice tečenja u odnosu na početnu vrijednost ako se nakon rasterećenja ponovo opterećuje u suprotnom smjeru), što je slučaj u procesima gdje nema cikličkih dinamičkih opterećenja. Za slučaj gdje je važno uzeti u obzir Bauschingerov efekt primjenjuje se model kinematskog očvršćivanja. Prema ovom modelu pretpostavlja se promjena položaja plohe tečenja u prostoru naprezanja bez promjene veličine i oblika.

Eksperimentalne ovisnosti naprezanja i deformacija u plastičnom području za jednoosno stanje naprezanja aproksimiraju se različitim nelinearnim funkcijama, krivuljama očvršćivanja, koje opisuju porast naprezanja potreban za porast plastične deformacije. Za obradu odvajanjem čestica, krivulje naprezanje - deformacija trebaju opisivati i omekšavanje materijala zbog porasta temperature te očvršćivanje materijala uslijed porasta brzine deformacije.



Općenito, u inženjerstvu se često koriste potencijalne funkcije za rješavanje pojedinih problema. Derivacijom potencijalne funkcije se dobiju pojedine veličine. Prema teoriji plastičnog potencijala, analogno izrazu (3.15.), pretpostavlja se postojanje plastične potencijalne funkcije pa promjena komponenti tenzora plastične deformacije ima pravac gradijenta na funkciju plastičnog potencijala  $g(\boldsymbol{\sigma}, T, H_\delta)$ :

$$d\varepsilon_{p,ij} = d\lambda \frac{\partial g(\boldsymbol{\sigma}, T, H_\delta)}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3.29.)$$

gdje je  $d\lambda$  faktor proporcionalnosti poznat kao plastični množitelj. Faktor proporcionalnosti nije konstantan i može biti funkcija povijesti plastične deformacije tj. može ovisiti o očvršćivanju materijala.

Prema pridruženom pravilu tečenja plastični potencijal jednak je funkciji tečenja pa pravilo pridruženo uvjetu tečenja glasi:

$$d\varepsilon_{p,ij} = d\lambda \frac{\partial f_y(\boldsymbol{\sigma}, T, H_\delta)}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3.30.)$$

Na temelju eksperimentalnih podataka za metale se najčešće primjenjuje pridruženo pravilo tečenja, a nepridruženo pravilo tečenja ( $f_y \neq g$ ) se koristi za opis plastičnog deformiranja materijala poput stijena, betona i sl.

Mnogi materijali pokazuju povećanje granice tečenja s porastom brzine deformacije. Utjecaj brzine deformacije je potrebno uzeti u obzir kod procesa gdje se javljaju visoke brzine deformacije što je slučaj u obradi odvajanjem čestica. Za modele materijala gdje brzina deformacije značajno utječe na ponašanje materijala, u izraz za funkciju tečenja uvodi se član koji opsuje utjecaj brzine deformacije.

#### *Von Mises uvjet tečenja*

U ovom radu primjenjuje se von Mises uvjet tečenja. Prema von Mises teoriji plastično deformiranje materijala nastupa kada druga invarijanta devijatorskog dijela tenzora naprežanja  $J'_2$  postigne kritičnu vrijednost  $\kappa^2$ :

$$J'_2 = \kappa^2 \quad (3.31.)$$

$$J_2' = \frac{1}{6} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2] + \sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2 = \kappa^2 \quad (3.32.)$$

Von Mises uvjet tečenja može se zapisati u funkciji glavnih napreznja  $\sigma_1, \sigma_2$  i  $\sigma_3$  kao:

$$J_2' = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \kappa^2 \quad (3.33.)$$

Kritična vrijednost  $\kappa^2$  je svojstvo materijala čija se vrijednost određuje pokusom rastezanja odnosno pokusom smicanja. Iz pokusa rastezanja slijedi  $\kappa^2 = \sigma_T / \sqrt{3}$ , dok iz pokusa smicanja slijedi  $\kappa = \tau_T$ .

Prema von Mises uvjetu tečenja ekvivalentno napreznje jednako je [11]:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3J_2'} = \sqrt{\frac{3}{2} (s_{ij}s_{ij})} \quad (3.34.)$$

Ako se pretpostavi izotropno očvršćivanje kao i utjecaj temperature i brzine deformacije na promjenu granice tečenja slijedi:

$$f_y(\boldsymbol{\sigma}, \bar{\varepsilon}_p, \dot{\bar{\varepsilon}}_p, T) = \bar{\sigma} - \sigma_y(\bar{\varepsilon}_p, \dot{\bar{\varepsilon}}_p, T) = 0 \quad (3.35.)$$

$$f_y(\boldsymbol{\sigma}, \bar{\varepsilon}_p, \dot{\bar{\varepsilon}}_p, T) = \sqrt{\frac{3}{2} (s_{ij}s_{ij})} - \sigma_y(\bar{\varepsilon}_p, \dot{\bar{\varepsilon}}_p, T) = 0 \quad (3.36.)$$

gdje je  $\sigma_y(\bar{\varepsilon}_p, \dot{\bar{\varepsilon}}_p, T)$  napreznje tečenja u pokusu jednoosnog napreznja koje ovisi o ekvivalentnoj plastičnoj deformaciji, brzini ekvivalentne plastične deformacije te temperaturi.

Analogno izrazu za ekvivalentno napreznje, postavlja se izraz za ekvivalentnu plastičnu deformaciju. Jedna od definicija za promjenu ekvivalentne plastične deformacije temeljene na pridruženom pravilu tečenja glasi:

$$d\bar{\varepsilon}_p = \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon_{p,ij} d\varepsilon_{p,ij} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\partial f_y}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial f_y}{\partial \sigma_{ij}}} d\lambda \quad (3.37.)$$

Ako se pretpostavi von Mises uvjet tečenja i primjeni uvjet konzistentnosti (svako stanje naprezanja u plastičnom području ne smije biti izvan plohe tečenja, a plastični potencijal mora biti pozitivan) može se izvesti izraz za promjenu plastične deformacije:

$$d\varepsilon_{p,ij} = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\varepsilon}_p}{\bar{\sigma}} s_{ij} \quad (3.38.)$$

Analogno izrazu za ekvivalentnu deformaciju, postavlja se izraz za brzinu ekvivalentne plastične deformacije. Izraz za brzinu ekvivalentne plastične deformacije temeljen na pridruženom pravilu tečenja glasi:

$$\dot{\bar{\varepsilon}}_p = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\varepsilon}_{p,ij} \dot{\varepsilon}_{p,ij} \quad (3.39.)$$

Obzirom da vrijedi:

$$d\bar{\varepsilon}_p = \dot{\bar{\varepsilon}}_p dt \quad (3.40.)$$

$$d\varepsilon_{p,ij} = \dot{\varepsilon}_{p,ij} dt \quad (3.41.)$$

izraz (3.38.) se može zapisati u obliku:

$$\dot{\varepsilon}_{p,ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}_p}{\bar{\sigma}} s_{ij} \quad (3.42.)$$

Preostalo je definirati izraz za porast temperature zbog plastičnih deformacija [17]:

$$\Delta T = \frac{\eta_p}{\rho c_p} \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p \quad (3.43.)$$

gdje je:

$\rho$  - gustoća materijala

$c_p$  - specifični toplinski kapacitet

$\boldsymbol{\sigma}$  - tenzor naprezanja

$\dot{\epsilon}_p$  – tenzor brzine plastične deformacije.

Vrijednost temperature se određuje dva puta. Prvi put u mehaničkoj analizi zbog plastične deformacije te drugi put u toplinskoj analizi tijekom određivanja unutarnje energije. Dakle, potrebno je provesti analizu prijenosa topline i mehaničku analizu istovremeno. To se može ostvariti potpuno spregnutom toplinsko-mehaničkom analizom gdje se jednadžbe nestacionarnog provođenja topline i jednadžbe gibanja rješavaju istovremeno.

#### *Zakon očvršćivanja*

Jedna od postavki modela koja utječe na rezultate simulacija je zakon očvršćivanja materijala obratka. Ako zakon tečenja materijala ne opisuje stvarno ponašanje materijala tijekom elasto-plastičnih deformacija, pojavit će se pogreške u predviđanju oblika odvojene čestice te ostalih izlaznih parametara kao npr. temperatura, sile rezanja, itd. Postoji više načina za definiranje zakona očvršćivanja, a zajednička karakteristika im je da moraju uspostaviti vezu između naprezanja i temperature, deformacije i brzine deformacije. Ovi se podaci određuju upotrebom različitih istraživačkih tehnika i metoda. S obzirom na to da se u obradi odvajanjem čestica javljaju velike plastične deformacije, visoke brzine deformacije te visoke temperature, spomenuta istraživanja su jako složena. Zakoni očvršćivanja dobiveni standardnim testovima za male brzine deformacije se ne mogu primijeniti kod ovih procesa. Stoga se primjenjuju alternativne metode kao npr. ispitivanje udarne radnje loma, visokobrzinski test sabijanja ili test primjenom Split-Hopkinsonove tlačne šipke (engl. Split Hopkinson Pressure Bar Test - SHPB). Međutim, ni alternativnim metodama se ne mogu postići toliko velike deformacije, visoke brzine deformacija i temperature koje se pojavljuju u obradi odvajanjem čestica. Zbog toga zakoni očvršćivanja kalibrirani na temelju eksperimentalnih podataka dobro opisuju ponašanje materijala uslijed manjih vrijednosti deformacija, brzina deformacija i temperatura. Naprezanje tečenja za ekstremnije uvjete se određuje ekstrapoliranjem krivulja koje se dobiju aproksimacijom eksperimentalnih podataka. Najčešće primjenjivani zakoni očvršćivanja u simulacijama obrade odvajanjem čestica su detaljnije objašnjeni u nastavku.

Johnson-Cookov (JC) zakon očvršćivanja [18] uključuje ovisnost granice tečenja o plastičnoj deformaciji i brzini deformacije. Također, model uključuje opis očvršćivanja i omekšavanja materijala s promjenom temperature materijala. Kod ovog modela, naprezanje tečenja  $\sigma_y$  definirano je sljedećim izrazom:

$$\sigma_y = [A + B\bar{\epsilon}_p^n] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_T - T_0} \right)^m \right] \quad (3.44.)$$

gdje je:

$\bar{\epsilon}_p$  - ekvivalentna plastična deformacija

$A$  - parametar koji predstavlja granicu tečenja pri sobnoj temperaturi i referentnoj brzini deformacije

$B$  - parametar koji opisuje očvršćivanje materijala uslijed plastičnih deformacija

$n$  - parametar koji opisuje očvršćivanje materijala uslijed plastičnih deformacija

$C$  - konstanta brzine deformacije

$\dot{\epsilon}_p$  – brzina ekvivalentne plastične deformacije

$\dot{\epsilon}_0$  - referentna brzina deformacije

$m$  - parametar koji opisuje omekšavanje materijala uslijed promjene njegove temperature

$T$  - trenutna temperatura materijala

$T_0$  - sobna temperatura

$T_T$  - temperatura taljenja materijala.

$A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$  i  $m$  su parametri koji se određuju na temelju prethodno navedenih testova za ispitivanje svojstva materijala. U izrazu (3.44.) prva zagrada predstavlja ovisnost granice tečenja o plastičnoj deformaciji, druga zagrada predstavlja utjecaj brzine deformacije te treća utjecaj temperature na naprezanje odnosno granicu tečenja [18].

Zerilli i Armstrong [19] su pokazali da ponašanje materijala pri velikim deformacijama ovisi o njihovoj mikrostrukturi. Zbog toga su razvili dva zakona: za metale s prostorno centriranom kubičnom rešetkom te za metale s plošno centriranom kubičnom rešetkom. Ovaj zakon obuhvaća utjecaj očvršćivanja materijala zbog plastičnih deformacija, utjecaj brzine deformacije te promjene temperature na očvršćivanje odnosno omekšavanje materijala. Za materijale s prostorno centriranom kubičnom rešetkom vrijedi sljedeći izraz:

$$\sigma_y = C'_0 + C'_1 \bar{\epsilon}_p^{0,5} e^{\left( -C'_3 T + C'_4 T \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right)} + C'_5 \bar{\epsilon}_p^{n'} \quad (3.45.)$$

Za metale s plošno centriranom kubičnom rešetkom, vrijedi sljedeći izraz:

$$\sigma_y = C'_0 + C'_2 \bar{\epsilon}_p^{0,5} e^{\left( -C'_3 T + C'_4 T \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right)} \quad (3.46.)$$

gdje su  $C'_0$ ,  $C'_1$ ,  $C'_2$ ,  $C'_3$ ,  $C'_4$ ,  $C'_5$  i  $n'$  parametri materijala.

Zakon očvršćivanja temeljen na Arrheniusovoj jednadžbi opisuje ponašanje materijala za različite temperature i brzine deformacije. Model uključuje Zener-Hollomonov parametar  $Z$  koji opisuje utjecaj temperature i brzine deformacije na ponašanje materijala [20]:

$$Z = \dot{\epsilon}_p e^{\frac{Q}{R'T}} \quad (3.47.)$$

gdje je:

$Q$  - energija aktivacije

$R'$  - univerzalna plinska konstanta.

Prijedlog izraza koji povezuje naprezanje tečenja, brzinu deformacije i temperaturu glasi [21]:

$$\dot{\epsilon}_p = A' F(\sigma_y) e^{-\frac{Q}{R'T}} \quad (3.48.)$$

gdje je:

$$F(\sigma_y) = [\sinh(\alpha\sigma_y)]^{n_a} \quad (3.49.)$$

te  $\alpha$ ,  $n_a$  i  $A'$  parametri Arrheniusovog zakona očvršćivanja.

Iz jednadžbi (3.48.) i (3.49.) slijedi:

$$\sigma_y = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{1/n_a} + \left[ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{2/n_a} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (3.50.)$$

Iz jednadžbe (3.50.) može se uočiti da utjecaj iznosa deformacije nije uzet u obzir. Ovaj zakon očvršćivanja se najčešće primjenjuje u procesima gdje se pojavljuju visoke temperature kao npr. kod oblikovanja u toplom stanju.

S ciljem povećanja točnosti simulacija, znanstvenici su razvili te primijenili modificirane zakone očvršćivanja za modeliranje obrade odvajanjem čestica kao npr. modificirani Johnson-Cookov zakon [22]–[24] i modificirani Zerilli-Armstrongov zakon [25], [26].

### 3.2. Modeli trenja i uvjeti dodira između alata i obratka

Obzirom da je u postupcima obrade odvajanjem čestica alat u zahvatu sa sirovcem potrebno je poznavati i raspodjelu tlakova na površinama koje su u dodiru. Dodir s trenjem vrsta je dodira do kojeg dolazi u svim realno postojećim kontaktnim problemima [27]. U procesu odvajanja

čestica, trenje se javlja prilikom dodira prednje površine alata i odvojene čestice. Za ostvarenje klizanja odvojene čestice po prednjoj površini alata potrebno je silu trenja nadvladati silama koje djeluju na pravcu tangencijalnom na površinu dodira. Intenzitet sile trenja ovisi o brzini odvojene čestice, tlaku dodira i temperaturi između alata i odvojene čestice što čini modeliranje trenja izrazito složenim. Međutim, zanemarivanjem trenja, u rezultat analize uvode se značajne pogreške. Još uvijek nije u potpunosti dovoljno dobro opisano ponašanje materijala pod utjecajem visokih brzina deformacija i visokih temperatura u području dodira alata i obratka. U literaturi se primjenjuju jednostavni modeli trenja koji nisu pogodni za uvjete koji se javljaju prilikom obrade odvajanjem čestica.

Prema Coulombovom zakonu trenja, smično naprezanje koje se javlja uslijed trenja,  $\tau$ , proporcionalno je normalnom tlačnom naprezanju (komponenta naprezanja u smjeru normale na prednju površinu alata),  $\sigma_n$ :

$$\tau = \mu\sigma_n \quad (3.51.)$$

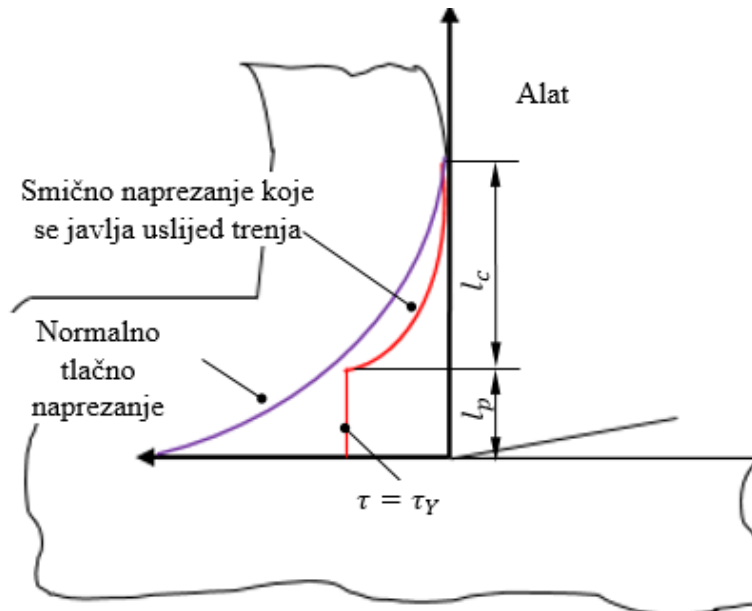
gdje je  $\mu$  Coulombov koeficijent trenja.

Zorevljev model trenja je u literaturi još poznat kao hibridni model trenja [28] te modificirani Coulombov model trenja [29]. U usporedbi s Coulombovim modelom, Zorevljev model se smatra pouzdanijim zbog podjele zone dodira alata i obratka na dvije zone, zonu lijepljenja (prianjanja) i zonu klizanja. U zoni lijepljenja vrijedi model smicanja dok u zoni klizanja vrijedi Coulombov model trenja. U zoni lijepljenja, normalno tlačno naprezanje je izrazito veliko te se postupno smanjuje u zoni klizanja. Odnosno, u zoni lijepljenja smično naprezanje koje se javlja uslijed trenja  $\mu\sigma_n$  je veće od smične granice tečenja obratka  $\tau_Y$ . Ovakvo stanje dovodi do toga da materijal obratka dostiže granicu tečenja te dolazi do njegove plastične deformacije, a ne do klizanja na površini dodira. S druge strane, u zoni klizanja smično naprezanje koje se javlja uslijed trenja  $\mu\sigma_n$  je manje od smične granice tečenja obratka  $\tau_Y$  te dolazi do klizanja između prednje površine alata i odvojene čestice. Opisana zakonitost dviju zona se matematički prikazuje na sljedeći način:

$$\tau = \tau_Y \text{ za slučaj } \tau_Y \leq \mu\sigma_n, \quad 0 < x \leq l_p \quad (3.52.)$$

$$\tau = \mu\sigma_n \text{ za slučaj } \tau_Y > \mu\sigma_n, \quad l_p < x \leq l_c \quad (3.53.)$$

gdje je  $l_p$  duljina zone lijepljenja te  $l_c$  duljina zone klizanja. Grafički prikaz dviju zona dan je na Slici 3.1.



Slika 3.1. Grafički prikaz raspodjele smičnog naprezanja koje se javlja uslijed trenja te tlačnog naprezanja na prednjoj površini alata

S druge strane, srednji koeficijent trenja između rezne oštrice i odvojene čestice u ortogonalnom rezanju se može procijeniti pomoću izmjerenih vrijednosti glavne sile rezanja  $F_c$ , posmične sile  $F_f$  i poznatog stražnjeg kuta alata  $\alpha$ :

$$\mu = \frac{F_f + F_c \tan \alpha}{F_c - F_f \tan \alpha} \quad (3.54.)$$

Za trodimenzionalne modele postoje dvije komponente smičnog naprezanja koja se javljaju između površina u dodiru  $\tau_1, \tau_2$ . Ekvivalentno smično naprezanje koje se javlja uslijed trenja definira se prema izrazu:

$$\bar{\tau} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} \quad (3.55.)$$



Za modificirani Coulombov model trenja se ekvivalentno smično naprezanje uspoređuje s maksimalnim ekvivalentnim smičnim naprezanjem. Sukladno navedenom, može se zapisati i izraz za ekvivalentnu brzinu klizanja:

$$\bar{v} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \quad (3.56.)$$

gdje su  $v_1$  i  $v_2$  komponente brzine klizanja.

Usljed trenja, javlja se toplinski tok odnosno kinetička energija zbog klizanja se pretvara u toplinu. Udio energije nastale zbog trenja koja se pretvara u toplinu se izražava preko koeficijenta  $\eta'$ . Gustoća toplinskog toka zbog klizanja se definiira prema izrazu:

$$q_T = \eta' \bar{\tau} \bar{v} \quad (3.57.)$$

Toplina koja prelazi na prvu površinu u dodiru (npr. odvojena čestica) se može zapisati kao:

$$q_{T1} = \omega' q_T \quad (3.58.)$$

gdje je  $\omega'$  udio generirane topline koji prelazi na prvu površinu. Dakle, toplina koja prelazi na drugu površinu u dodiru se može zapisati kao:

$$q_{T2} = (1 - \omega') q_T \quad (3.59.)$$

Numerička analiza kontaktnog problema s trenjem mora onemogućiti prodiranja jednog tijela u drugo te razmotriti uvjete lijepljenja i klizanja. Kako bi se onemogućilo prodiranje jednog tijela u drugo potrebno je zadovoljiti uvjete ograničenja:

$$\zeta > 0 \text{ za slučaj kada tijela nisu u dodiru}$$

$$\zeta = 0 \text{ za slučaj kada su tijela u dodiru}$$

gdje je  $\zeta$  veličina (udaljenost) prodora. Kako bi se minimiziralo prodiranje odvojene čestice u alat, u ovom radu primijenjen je model čvrstog kontakta (engl. hard contact) u programskom paketu ABAQUS. Kada postoji zračnost između površina, tlak je jednak nuli. Kada je zračnost između površina jednak nuli, površine su u dodiru i dolazi do porasta tlaka, Slika 3.2.



Slika 3.2. Dijagram kontaktnog tlaka i udaljenost površina u dodiru

U kontaktnoj mehanici najčešće se koriste dvije metode koje se primjenjuju u problematici optimizacije s ograničenjima: kaznena metoda (engl. penalty) i metoda Lagrangeovih multiplikatora [27]. U ovom radu primijenjena je kaznena metoda koja primjenjuje kazneni faktor te vrijednost prodora. Kazneni faktor ima fizikalno značenje kontaktne krutosti. Kontaktna sila je proporcionalna s veličinom prodora te kaznenog faktora. Iz iteracije u iteraciju dolazi do kontinuiranog povećanja vrijednosti kaznenog faktora. Na ovaj način se dolazi do rješavanja problema penetriranja jedne površine u drugu. Općenito govoreći, težnjom vrijednosti kaznenog faktora u beskonačnost, vrijednost prodora teži u nulu. Opisana kaznena metoda pridjeljuje kontaktne sile na čvorove koji se nalaze na sporednoj površini (engl. slave surface) dok se iste sile, ali suprotno usmjerene pridjeljuju na glavnoj površini (engl. master surface) u točki gdje se dogodila penetracija.

Kaznena metoda ipak u potpunosti ne sprječava prodor glavne površine u sporednu površinu. Navedeni nedostatak se može eliminirati ispravnim odabirom veličine elementa na svim tijelima u dodiru.

### 3.3. Modeliranje nastajanja odvojene čestice

Nastajanje odvojene čestice je jedan od glavnih problema u modeliranju obrade odvajanjem čestica metodom konačnih elemenata. Ovaj problem se može razmatrati iz dva aspekta: postavljanje kriterija za nastajanje odvojene čestice i modelska realizacija.

Prilikom velikih lokalnih plastičnih deformacija obratka dolazi do procesa nastajanja odvojene čestice. Postoje dvije osnovne metode za modeliranje nastajanja odvojene čestice tijekom obrade. Prva metoda primjenjuje kriterij za nastajanje odvojene čestice te je potrebno unaprijed definirati liniju razdvajanja. Druga metoda je tzv. čisto deformacijska metoda gdje tu liniju nije potrebno prethodno definirati [30].

Kriteriji za nastajanje odvojene čestice se mogu podijeliti u dvije glavne grupe: geometrijski i fizikalni kriteriji [30], [31]. Prema geometrijskom kriteriju, nastajanje odvojene čestice počinje kada udaljenost između vrha rezne oštrice alata i najbližeg čvora duž linije razdvajanja na obratku dostigne kritičnu vrijednost (kritičnu udaljenost). Tada se taj čvor odvaja od obratka i postaje dijelom odvojene čestice. Kritična vrijednost se bira proizvoljno te ovisi o veličini elementa. Dakle, ova metoda se ne temelji na mjerljivim fizikalnim svojstvima materijala obratka. Kod fizikalnog kriterija, nastajanje odvojene čestice nastupa kada unaprijed određeni fizikalni parametar (kao npr. naprezanje ili ekvivalentna plastična deformacija) dostigne kritičnu vrijednost u integracijskoj točki koja je najbliža vrhu rezne oštrice alata. Tada dolazi do odvajanja čvorova ili potpunog brisanja elemenata. Fizikalni kriteriji su temeljeni na mjerljivim fizikalnim svojstvima materijala obratka, ali problem je utvrditi kritične veličine za stvarni proces. Prema Guo i Liu [32] kriterij nastajanja odvojene čestice ne utječe na sile rezanja koje se javljaju prilikom simulacija obrade odvajanjem čestica, ali prema  $E_e$  [31] kriterij značajno utječe na vrijednosti zaostalih naprezanja.

Modeliranje nastajanja odvojene čestice može se realizirati različitim metodama kao što su: dijeljenje čvorova, odljepljivanje čvorova, brisanje elemenata i kontinuirano adaptivno regeneriranje mreže. Iako pristup s adaptivnim generiranjem mreže poboljšava točnost simulacija, značajno povećava računsku složenost i vrijeme provedbe simulacije.

Za definiranje fizikalnog kriterija za nastajanje odvojene čestice primjenjuju se modeli koji opisuju oštećenje u materijalu. Za duktilne materijale (npr. aluminijska legura koja je i razmatrana u ovom radu) oštećenje nastaje kada varijabla stanja  $\omega_D$  postigne vrijednost jedan [33]:

$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\epsilon}_p}{\bar{\epsilon}_{p,D}(\eta_t, \dot{\bar{\epsilon}}_p)} = 1 \quad (3.60.)$$

gdje je:

$\bar{\epsilon}_{p,D}$  - ekvivalentna plastična deformacija pri kojoj dolazi do oštećenja

$\eta_t$  - koeficijent troosnog stanja naprezanja.

Koeficijent troosnog stanja naprezanja se može odrediti kao omjer hidrostatskog naprezanja i ekvivalentnog naprezanja. Kako bi se u obzir uzelo omekšanje materijala zbog razvoja oštećenja u materijalu, uvodi se varijabla  $D$  koja definira razinu oštećenje materijala te vrijedi:

$$\sigma_D = (1 - D)\sigma \quad (3.61.)$$

gdje je:

$\sigma_D$  - tenzor naprezanja za oštećeni materijal

$\sigma$  - tenzor naprezanja za slučaj neoštećenog materijala.

Pojedina istraživanja koriste Johnson-Cookov model inicijacije kao kriterij za modeliranje stvaranja inicijalnog oštećenja te model temeljen na energiji loma za modeliranje razvoja oštećenja do krajnjeg loma [34]–[36].

Prema Johnson-Cookovom kriteriju oštećenja (modelu inicijacije oštećenja) [37] ekvivalentna plastična deformacija pri kojoj dolazi do oštećenja se definira izrazom:

$$\bar{\epsilon}_{p,D} = [D_1 + D_2 e^{D_3 \eta_t}] \left[ 1 + D_4 \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}_p}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right] \left[ 1 + D_5 \left( \frac{T - T_0}{T_T - T_0} \right) \right] \quad (3.62.)$$

gdje su  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$  materijalni parametri loma.

Razvoj oštećenja u materijalu se može definirati pomoću modela temeljenog na efektivnom razdvajanju tj. pomoću ekvivalentnog plastičnog pomaka  $\bar{u}_p$  koji je jednak nuli do trenutka nastanka oštećenja, a potom raste brzinom:

$$\dot{\bar{u}}_p = L \dot{\bar{\epsilon}}_p \quad (3.63.)$$

gdje je  $L$  karakteristična duljina konačnog elementa koja ovisi o vrsti elementa.

Ako se pretpostavi linearni razvoj oštećenja, varijabla  $D$  raste brzinom:

$$\dot{D} = \frac{\dot{\bar{u}}_p}{\bar{u}_{p,D}} = \frac{L \dot{\bar{\epsilon}}_p}{\bar{u}_{p,D}} \quad (3.64.)$$

gdje  $\bar{u}_{p,D}$  predstavlja ekvivalentni plastični pomak pri potpunom lomu.

U sljedećem poglavlju predstavljen je pregled dosadašnjih istraživanja u literaturi, a obuhvaća numeričko modeliranje obrade odvajanjem čestica. U fokusu je predviđanje sila rezanja i temperature u zoni rezanja numeričkim simulacijama temeljenim na metodi konačnih elemenata.

#### **4. PREDVIĐANJA IZLAZNIH VELIČINA OBRADJE ODVAJANJEM ČESTICA U NUMERIČKIM MODELIMA TEMELJENIM NA METODI KONAČNIH ELEMENATA**

Kako je proces odvajanja čestica izrazito složen, za njegovo modeliranje potrebno je uzeti u obzir mnogo značajki. Vrlo važno je izabrati odgovarajući programski paket za modeliranje procesa kako bi se provele kvalitetne analize. Najčešće primjenjivani programski paketi za simulaciju obrade odvajanjem čestica su: DEFORM 2D/3D, ABAQUS/Explicit i AdvantEdge [38]. Programski paket AdvantEdge specijaliziran je za modeliranje obrade odvajanjem čestica. Problem rješava eksplicitno te je moguće provesti detaljnu toplinsko mehaničku analizu procesa. Također, ovaj paket sadrži opsežnu bazu standardnih alata te zakona očvršćivanja. Omogućeno je jednostavno modeliranje i definiranje postavki simulacije. Pored toga, moguće je kreirati vlastitu geometriju alata i obratka te vlastiti zakon očvršćivanja. Njegov glavni nedostatak su pojedina ograničenja gdje korisnik nije dovoljno fleksibilan u definiranju značajki samog procesa (npr. koeficijent trenja u sučelju alat/odvojena čestica je konstantan i iznosi 0,5). S druge strane DEFORM 2D/3D rješava probleme samo implicitno zbog čega je za provedbu složenih simulacija potrebno mnogo vremena. Baza podataka o standardnim alatima i zakonima očvršćivanja je nešto manja u usporedbi s AdvantEdge programom, ali ima određenu razinu otvorenosti. U programskom paketu ABAQUS/Explicit vrijeme potrebno za definiranje postavki modela je nešto duže s obzirom na to da ne sadržava bazu podataka o standardnim geometrijama alata i zakonima očvršćivanja. Definiranje modela zahtjeva i visoko kvalificiranog korisnika koji mora sam definirati alat, obradak, parametre obrade, rubne uvjete i geometriju mreže. S druge strane, korisnik je izrazito fleksibilan u pogledu definiranja postavki modela (velika otvorenost) [39].

Različite formulacije se koriste u simulacijama obrade odvajanjem čestica za opis procesa. Kod modeliranja postupka temeljenog na MKE najčešće korištene formulacije su Eulerova, Lagrangeova, obnovljena Lagrangeova i proizvoljna Lagrange-Eulerova (engl. Arbitrary Lagrange Euler, ALE) formulacija. U posljednjih nekoliko godina na važnosti dobiva i spregnuta Euler-Lagrangeova (engl. Coupled Euler-Lagrange - CEL) formulacija [40]. Eulerova i Lagrangeova formulacija su osnovne formulacije. Kako bi se iskoristile njihove pojedinačne prednosti i smanjio utjecaj njihovih nedostataka, istraživači su kombiniranjem dviju osnovnih formulacija razvili ALE i CEL formulacije.

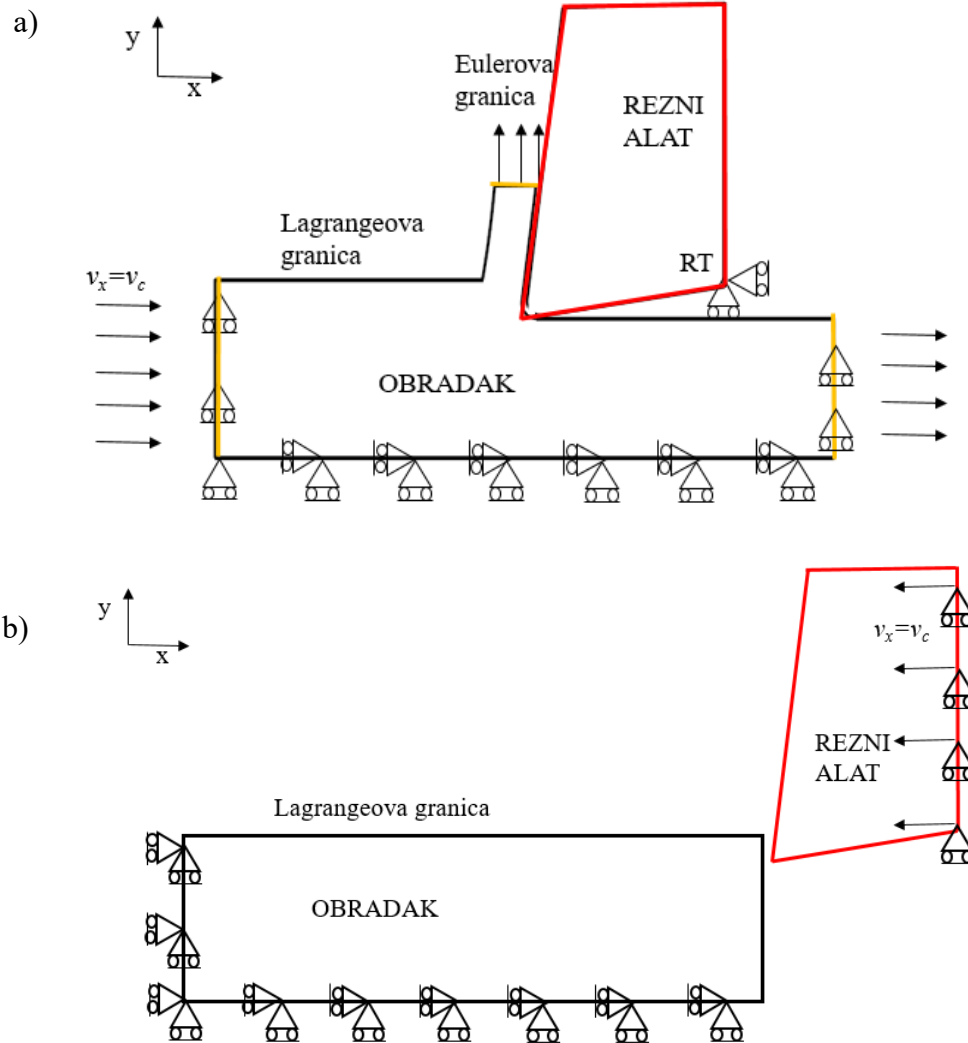
U Lagrangeovoj formulaciji je mreža konačnih elemenata vezana za obradak, mreža se deformira s obratkom. Drugim riječima, na kraju svakog koraka koordinate čvorova se ažuriraju. Ako su deformacije velike, što je slučaj u obradi odvajanjem čestica, može doći do ekstremne distorzije mreže odnosno elemenata. Zbog toga je poželjno da se postojeća distorzirana mreža zamjenjuje novom što se postiže regeneriranjem ili adaptivnim generiranjem mreže. To može značajno povećati vrijeme potrebno za obradu podataka. Drugi nedostatak je taj što je potrebno definirati kriterij za nastajanje odvojene čestice. Odnosno, čvorovi duž unaprijed definirane linije se razdvajaju kada alat prijeđe određenu duljinu puta prilikom prodiranja u obradak ili kada vrijednost efektivne deformacije prijeđe određenu graničnu vrijednost [41]. Određivanje parametara koji opisuju kriterij za nastajanje odvojene čestice je zahtjevno jer ne postoji dovoljno dostupnih podataka iz tog područja [42] te se bazira na iskustvu istraživača ili preporučenim vrijednostima. Prednosti Lagrangeove formulacije su te što nije potrebno unaprijed definirati geometriju odvojene čestice i njene granice.

U Eulerovoj formulaciji, mreža konačnih elemenata je fiksirana u prostoru odnosno koordinate čvorova se ne mijenjaju u vremenu. Materijal se giba kroz fiksiranu mrežu te je tako eliminirana distorzija mreže odnosno elemenata. Također, nije potrebno definirati kriterij za nastajanje odvojene čestice. Ali, ova formulacija zahtijeva unaprijed definiranje početne geometrije i granica odvojene čestice, definiranje duljine dodira između alata i obratka te uvjete dodira u sučelju odvojena čestica - alat. Dakle geometrija odvojene čestice mora biti ulazni parametar, a ne izlazni parametar obrade odvajanjem čestica.

Proizvoljna Lagrange-Eulerova formulacija kombinira značajke prethodne dvije formulacije. U pojedinim područjima mreža je fiksirana (Eulerovo područje), a u drugim područjima mijenja se s promjenom geometrije tijela (Lagrangeovo područje). S obzirom na to da najveće plastične deformacije nastaju oko vrha rezne oštrice alata, gdje i dolazi do nastajanja odvojene čestice, u tom području poželjno je definirati Eulerovu formulaciju. Najčešće se koriste dvije vrste ALE formulacije [43]: ALE s Eulerovim i Lagrangeovim granicama i ALE samo s Lagrangeovim granicama. U prvoj metodi potrebno je unaprijed definirati geometriju odvojene čestice što je ujedno i njen glavni nedostatak. Eulerovom formulacijom se definira područje ulaza i izlaza obratka te izlazak odvojene čestice. Lagrangeovom formulacijom se definira gornje i donje područje obratka kako je i prikazano na Slici 4.1a). Drugom metodom moguće je simulirati cijeli proces odvajanja čestica bez definiranja geometrije odvojene čestice, ali u većini slučajeva oblik odvojene čestice ne odgovara realnom stanju [44]. Razlika između dvije

4. Predviđanja izlaznih veličina obrade odvajanjem čestica u numeričkim modelima temeljenim na metodi konačnih elemenata

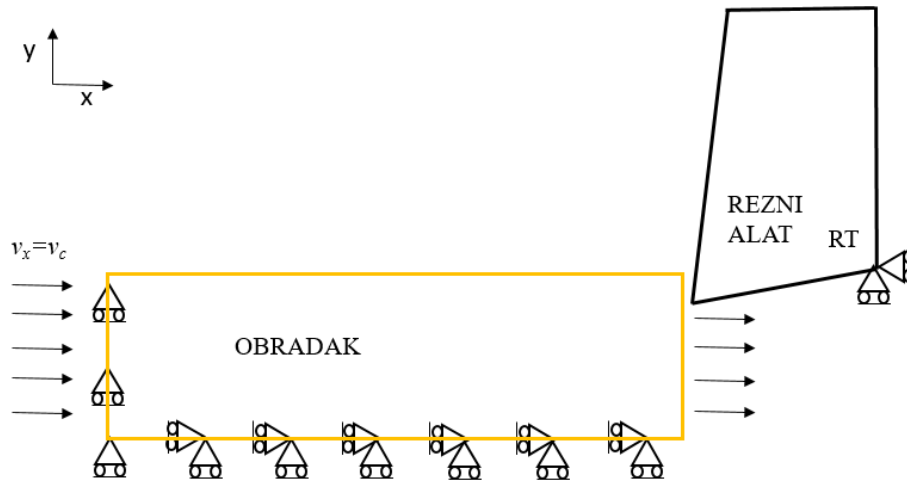
metode ALE formulacije je prikazana na Slici 4.1., a prednosti su te što je smanjena distorzija mreže te nije potrebno definirati kriterij za nastajanje odvojene čestice. Na Slici 4.1. je prikazan izgled obratka i alata prije početka simulacije za obje ALE formulacije.



Slika 4.1. ALE formulacija s: a) Eulerovim i Lagrangeovim granicama i b) Lagrangeovim granicama [43]

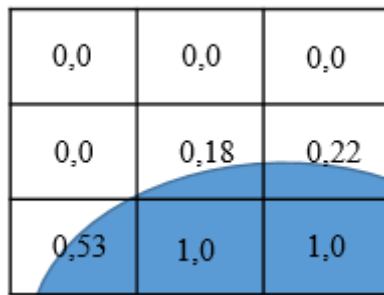
Da bi se eliminirali navedeni nedostaci ALE formulacije, u zadnjem desetljeću se počela primjenjivati spregnuta Euler-Lagrangeova formulacija kod simulacije obrade odvajanjem čestica. Iako se ova formulacija općenito koristi gdje postoji interakcija čvrstog materijala i fluida, postoje istraživanja koja su utvrdila da je pogodna u slučaju gdje se pojavljuju velike deformacije [45], [46]. Lagrangeova formulacija se primjenjuje za modeliranje alata dok se Eulerova formulacija primjenjuje za modeliranje obratka, Slika 4.2.





Slika 4.2. CEL formulacija

Lagrangeovi elementi su uvijek ispunjeni s jednim modelom materijala pa se granica materijala podudara s granicom elemenata. Eulerovi elementi ne moraju uvijek biti ispunjeni materijalom pa se granica materijala ne treba podudarati s granicom elementa. Stoga se granice Eulerovog materijala prate pomoću Eulerovog volumnog udjela materijala (engl. Eulerian Volume Fractions - EVF). Ako je element u potpunosti ispunjen materijalom, tada je  $EVF = 1$ , a ako se u elementu ne nalazi materijal, tada je  $EVF = 0$ . U elementima čija vrijednost EVF je između 0 i 1, granica materijala ne odgovara granici elementa kako je i prikazano na Slici 4.3. Prednosti ove formulacije su što je eliminirana distorzija mreže te nije potrebno definirati geometriju odvojene čestice.



Slika 4.3. Prikaz EVF vrijednosti i odgovarajućih granica materijala [47]

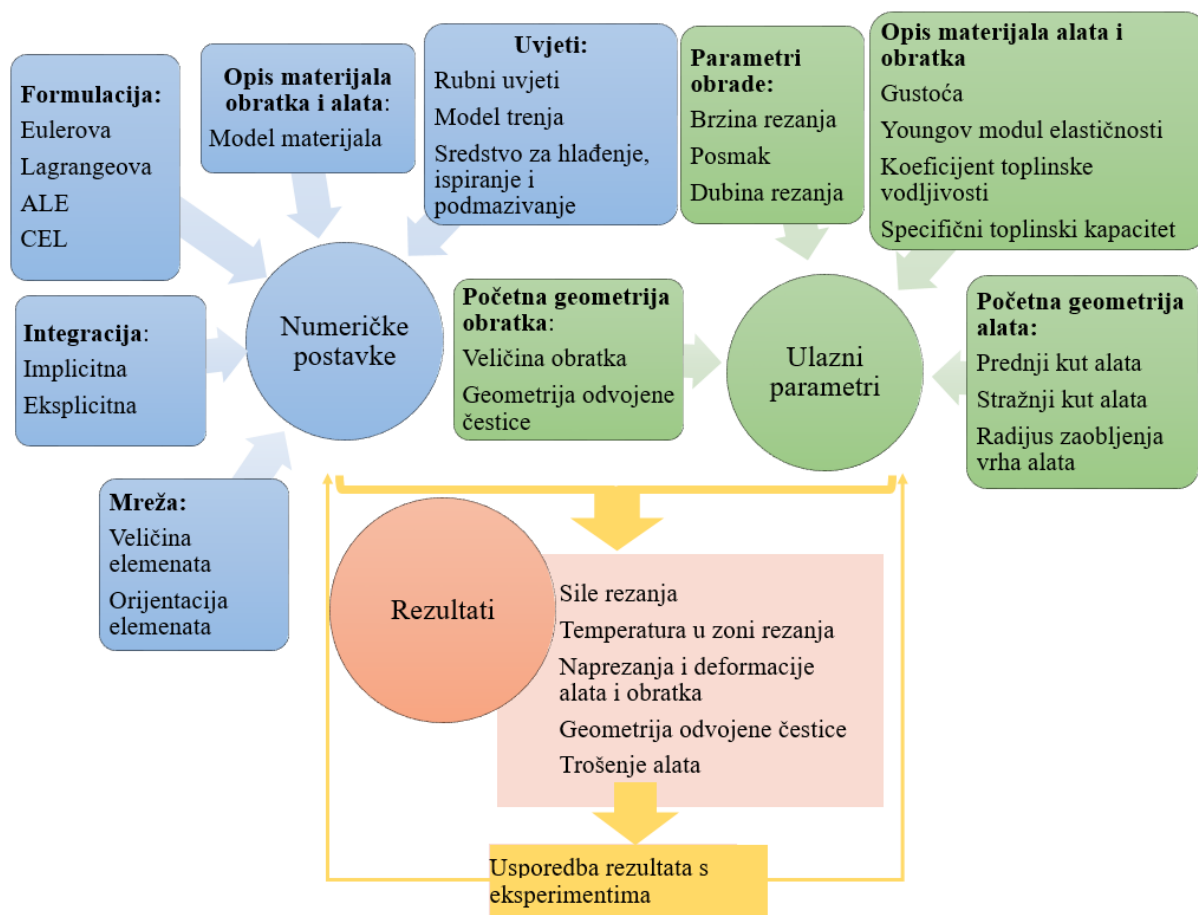
Također je važno naglasiti značajan utjecaj veličine elementa na rezultate simulacija. Primjena elemenata manje veličine na obratku omogućuje preciznije rezultate. Fina mreža mora biti postavljena i oko vrha rezne oštrice alata kako bi se eliminiralo preklapanje mreže alata i obratka [48]. Također, prema Movahhedu [48] veličina elementa oko vrha reznog alata mora

biti manja od vrha zaobljenja alata. S druge strane, smanjenjem veličine elemenata, prirast vremena (u eksplicitnoj vremenskoj integraciji) se smanjuje, povećava se broj čvorova i stoga se povećava vrijeme potrebno za provedbu simulacije. Odabir odgovarajuće veličine elementa je kritičan parametar u simulacijama te se mora odabrati kao kompromis potrebne točnosti rezultata i ekonomske isplativosti.

U numeričkim analizama koje se temelje na MKE, alat se većinom predstavlja kao kruto tijelo [45], [49]–[52] jer je njegova tvrdoća puno veća od tvrdoće obratka. Tako je smanjeno vrijeme potrebno za provedbu simulacije jer nije potrebno proračunavati pomake čvorova elemenata alata. Al-Zkeri i suradnici [53] su usporedili rezultate simulacija kada su pretpostavili alat kao kruto tijelo i kao elastično tijelo. Rezultati su se razlikovali manje od 2 % kod predviđanja naprezanja u obratku i predviđanja sila rezanja. Tako je potvrđeno da je ispravna pretpostavka o alatu kao krutom tijelu.

Simulacijama obrade odvajanjem čestica mogu se predvidjeti razni procesni parametri. Prije svega može se predvidjeti oblik odvojene čestice. Ovisno o brzini rezanja, materijalu obratka te prednjem kutu reznog alata razlikuje se trakasta, lamelarna, rezana te kidana odvojena čestica. Također, debljina odvojene čestice je parametar koji se najčešće koristi (u pogledu morfologije odvojene čestice) u provjeri točnosti simulacija koje se temelje na MKE. Trakasta odvojena čestica se može predvidjeti upotrebom nekih od spomenutih kriterija za nastajanje odvojene čestice [34] ili primjenom čiste deformacijske metode i regeneriranjem mreže [54]. Kod predviđanja pojave rezane odvojene čestice također se primjenjuju kriteriji za nastajanje odvojene čestice [34]–[36]. Duljina dodira odvojene čestice i reznog alata je također značajan parametar jer utječe na sile trenje koje se javljaju u samoj obradi odvajanjem čestica. Međutim, zbog velikih razlika između eksperimentalnih podataka i numeričkih predviđanja [55], [56], duljina dodira se ne koristi često kao parametar za validaciju simulacija obrade. Pojedini znanstvenici predviđaju eksperimentalnim te numeričkim putem trošenje alata [57], formiranje naljepka na prednjoj površini alata [58], integritet obrađene površine [50], [59]–[65], zaostala naprezanja [29], [66]–[70]. Sile rezanja te temperatura u zoni rezanja su parametri koji se također mogu predvidjeti u simulacijama obrade odvajanjem čestica, a zbog njihovog velikog značaja detaljnije su objašnjeni u nastavku.

Na Slici 4.4. su prikazani ulazni parametri, numeričke postavke te rezultati numeričkih analiza koji su detaljnije objašnjeni u nastavku.



Slika 4.4. Ulazni parametri, numeričke postavke i rezultati numeričkih simulacija

#### 4.1. Predviđanje sile rezanja u obradi odvajanjem čestica

Velike sile rezanja uzrokuju ubrzano trošenje alata, pojavu podrhtavanja i povećani utrošak snage [71], [72]. Utjecaj parametara obrade na sile rezanja je istražen u više radova. Li i Shih [73] su proučavali utjecaj brzine rezanja na glavnu silu rezanja, posmičnu silu i silu prodiranja u simulaciji 3D ortogonalnog rezanja komercijalno čistog titana. Uočen je pad glavne sile rezanja s povećanjem brzine rezanja. Numeričke simulacije su predvidjele za oko 15 % manje vrijednosti glavne sile rezanja te za oko 10 % manje vrijednosti posmične sile i sile prodiranja u odnosu na eksperimentalne podatke. Također, zaključili su da je nužno postaviti malu veličinu elementa u obratku i odvojenoj čestici te malu veličinu elementa u alatu kako bi se dobio odgovarajući izgled odvojene čestice. S druge strane, Tzotzis i suradnici [74] su predvidjeli rast glavne sile rezanja s porastom brzine rezanja i posmaka u 3D simulacijama izrade uvrta u obratku aluminijske legure (EN AW 7075 T6). Parihar i suradnici [75] su predvidjeli isto u 3D simulacijama ortogonalnog rezanja čelika X40CrMoV5-1. Ozel i

suradnici [76] su za leguru Ti-6Al-4V numerički i eksperimentalno potvrdili da porastom posmaka raste vrijednost glavne sile rezanja. Razmatrane su i različite presvlake alata (bez presvlake, TiAlN presvlaka, TiAlN + CBN). I u njihovom radu su simulacije predvidjele za oko 5 % manje vrijednosti glavnih sila rezanja, a za posmične sile su odstupanja i do 15 % u odnosu na eksperimentalne podatke. Veće razlike u vrijednostima (između eksperimentalnih podataka i numeričkih predviđanja) posmične sile u odnosu na vrijednosti glavne sile rezanja su predstavljene i za materijale X40Cr14 [77], C45U [58], EN AW 7075 [78]–[80], EN AW 7050 T7451 [81], EN AW 2024 T3 [80] i EN AW 6061 T6 [80]. Za leguru EN AW 2024 T351, s povećanjem brzine rezanja, uočene su manje razlike u predviđanjima glavne sile rezanja [36], [82]. U numeričkim simulacijama je potvrđeno da na glavnu silu rezanja utječe i prednji kut rezne oštrice alata. Odnosno, za manje vrijednosti prednjeg kuta rezne oštrice alata veće su sile rezanja; za čelik C15R [83] i za Ti-6Al-4V [84]. Suprotno eksperimentalnim istraživanjima, numerička analiza predviđa da povećanjem radijusa zaobljenja rezne oštrice alata dolazi i do povećanja glavne sile rezanja [73], [85], [86]. Također je važno naglasiti da na vrijednosti glavne sile rezanja utječe i materijal alata [87].

Munoz [88] je dobio preciznija predviđanja sila rezanja s 2D modelom nego s 3D modelom. Za brzinu rezanja od 120 m/min odstupanje eksperimentalnih vrijednosti glavnih sila rezanja i vrijednosti istih dobivenih simulacijama je do 23 % dok za posmične sile odstupanje je znatnije (do 38 %). Također je usporedio i utjecaj dva kriterija za nastajanje odvojene čestice pri obradi Ti-6Al-4V legure: Rittel-Wang-Merzer i Cockcroft-Latham kriterij. Primjenom prvog kriterija su ostvarena značajno bolja predviđanja.

U svojim radovima Laasko i suradnici su zaključili da za čelik C45U, odabir vrijednosti parametara Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja, a posebno konstanta brzine deformacije (parametar  $C$ ) ima značajan utjecaj na predviđanje sila rezanja [89], [90]. Također su zaključili da se primjenom izmijenjenog Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja (izmijenjen je utjecaj brzine rezanja i topline) mogu dobiti precizniji rezultati glavne sile rezanja [91]. Isto tako, istražitelji su predstavili da i za materijale EN AW 2024 T3 [65], Ti-6Al-4V [23], [24], [92], [93], X5CrNiCuNb16-4 [94], EN AW 6061 T6 [95] i EN AW 7075 T65 [95] zakon očvršćivanja utječe na glavnu i posmičnu silu rezanja.

U radu Bila [83], za čelik C15R je zaključeno da značajan utjecaj (značajniji od vrijednosti parametara zakona očvršćivanja) na predviđanje vrijednosti sila rezanja ima i model trenja. Isto je zaključeno i za čelik X2CrNiMo17 12-3 [96]. Coulombov model trenja se nije pokazao

prikladnim za modeliranje obrade odvajanjem čestica, a uočen je utjecaj i vrijednosti smičnog koeficijenta trenja na glavnu silu rezanja [83]. S druge strane, primjenom temperaturno ovisnog Coulombovog koeficijenta trenja mogu se dobiti najpreciznije vrijednosti glavne i posmične sile rezanja kod čelika 42CrMoS4 [97]. Saleem i suradnici [36] su istražili utjecaj vrijednosti Coulombovog koeficijenta trenja i prednjeg kuta rezne oštrice alata u simulacijama 2D ortogonalnog rezanja legure EN AW 2024 T351.

Za modeliranje 2D ortogonalnog rezanja legure EN AW 2024 T351, Haddag i suradnici [98] su upotrijebili Lagrangeovu formulaciju te proizvoljnu Lagrange-Eulerovu formulaciju (ALE). Za predviđanje posmične sile, primjenom ALE formulacije su predviđeni precizniji rezultati i to za oko 40 %. Također, primjenom ALE formulacije su predviđeni i precizniji rezultati glavne i posmične sile rezanja u odnosu kada je primijenjena Lagrangeova formulacija [99]. U tom istraživanju korišten je čelik S45C te MQL (engl. Minimum quantity lubrication, minimalna količina sredstva za podmazivanje) uvjet obrade. Ovaj uvjet obrade je definiran pomoću koeficijenta trenja čija vrijednost je određena tako da vrijednosti glavne sile rezanja dobivene numeričkom analizom i eksperimentalnom analizom što manje odstupaju. U radu Ozela i suradnici [22], primjenom ALE formulacije su dobiveni bolji rezultati glavne sile rezanja (greška manja za 24 %) u odnosu na obnovljenu Lagrangeovu formulaciju (u programskom paketu DEFORM). S druge strane, primjenom obnovljene Lagrangeove formulacije su dobiveni bolji rezultati posmične sile (greška manja za 14 %) nego s primjenom ALE formulacije. Suprotno navedenim istraživanjima, u radu Vaziri i suradnici [100] su zaključili da se primjenom ALE formulacije i obnovljene Lagrangeove formulacije mogu predvidjeti približno jednako točne vrijednosti glavnih sila rezanja. Odstupanja u predviđanjima su bila veća kod obnovljene Lagrangeove formulacije, dok je vrijeme za provedbu simulacije bilo manje i do 125 puta.

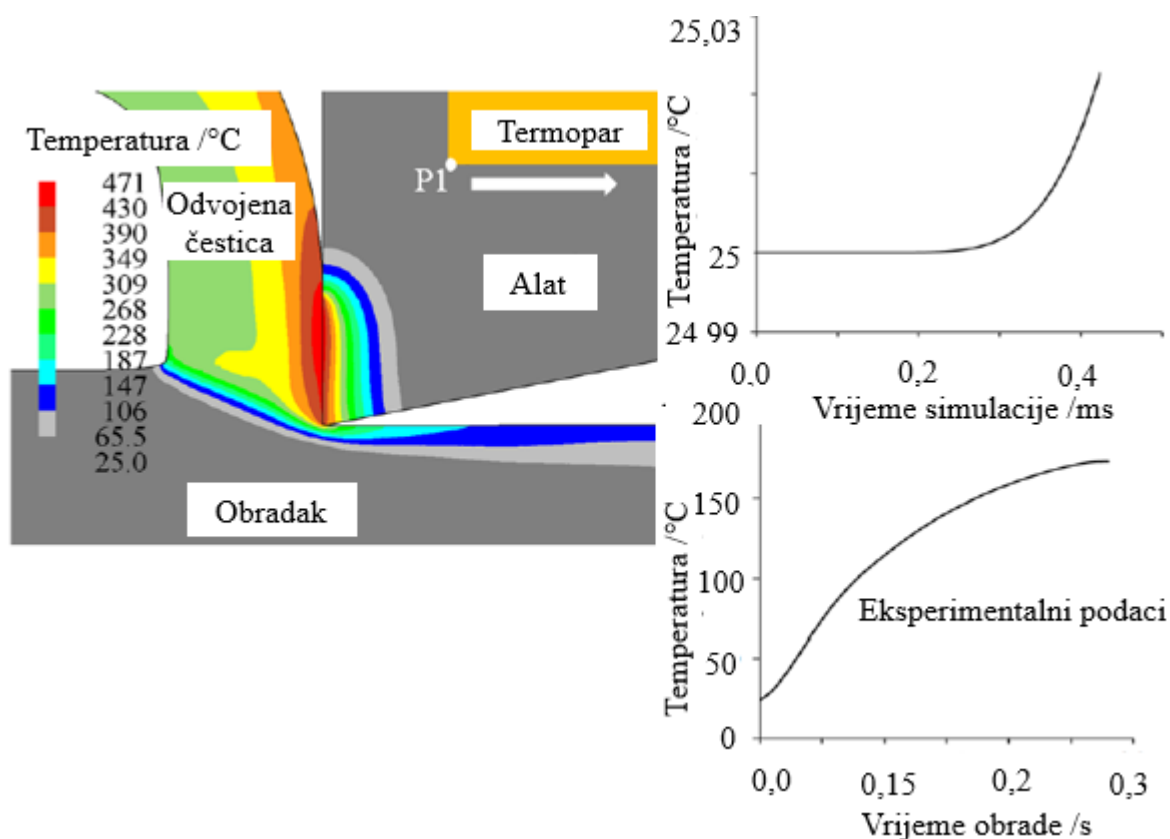
S obzirom na to da veličina elementa utječe na rezultate numeričkih simulacija, Harzallah i suradnici [101] su proveli analizu optimalne veličine konačnog elementa kojim se diskretizira volumen obratka obzirom na pogrešku predviđanja glavne sile rezanja i vremena potrebnog za provedbu simulacije. I u ovom radu su odstupanja eksperimentalnih i numeričkih vrijednosti veća za posmične sile nego za glavne sile rezanja. Obzirom na navedeno, može se zaključiti da bi optimizacija veličine konačnog elementa kojim se diskretizira obradak mogla doprinijeti poboljšanju predviđanja razmatranog procesa.

## 4.2. Predviđanje raspodjele temperature u zoni rezanja

Predviđanje temperature tijekom obrade je izrazito važno jer visoke temperature mogu uzrokovati dimenzijske pogreške obratka, fazne transformacije, ubrzano trošenje alata te pojavu tlačnog zaostalog naprezanja. Stvorena toplina posredno utječe na mehanička svojstva obratka i sile rezanja [102]. Također, visoke temperature mogu utjecati na svojstva materijala alata odnosno smanjiti njegovu tvrdoću. Nekoliko autora je upotrijebilo simulacije koje se temelje na MKE za predviđanje raspodjele temperature u zoni rezanja.

Sahib i suradnici [103] su proučavali raspodjelu temperatura pri ortogonalnom rezanju C45U materijala kada se primjenjuju različite presvlake alata (TiN, TiN/TiCN, TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN). Temperatura raste s porastom brzine rezanja te posmične brzine za sve slučajeve modela alata. Također je uočeno da se manje temperature na alatu javljaju u slučaju kada alat ima presvlaklu jer se tada više temperature odvodi u obradak odnosno odvojenu česticu. Slično je uočeno i za čelik 40NiCrMo4 [104]. Porastom brzine rezanja dolazi i do porasta temperature u zoni rezanja, a najmanje temperature se javljaju samo s Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presvlakom alata [104]. Parida i suradnici [105] su također proučavali utjecaj parametara obrade čelika X2CrNiMo17 12-3 na temperature rezanja. Numeričke simulacije su predvidjele porast temperatura u zoni rezanja s porastom brzine rezanja i posmaka. Ozel i Zeren [43] su pokazali da povećanjem radijusa zaobljenja oštrice alata dolazi do povećanja temperature rezanja za materijal obratka 40NiCrMo4. U radu Tanga i suradnika [106] simulacije su pretpostavile prvo pad, a zatim porast maksimalne temperature na obratku (X153CrMoV12) s porastom dubine rezanja. Zaključili su i da je utjecaj dubine rezanja na temperature mnogo manji od utjecaja brzine rezanja. Maranhao i Davim [107] su numeričkom analizom zaključili da povećanjem prednjeg kuta rezne oštrice alata dolazi do smanjena temperature u zoni rezanja pri 2D ortogonalnom rezanju EN AW 7075 legure.

Daoud [5] je zaključio da vrijednosti parametara Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja ne utječu značajno na temperaturu predviđenu numeričkim simulacijama. Također je uočio da pri 2D simulaciji ortogonalnog rezanja nije moguće precizno predvidjeti temperaturu u zoni rezanja, Slika 4.5. S druge strane, Ebrahimi i suradnici [94] su zaključili da se pogreška u maksimalnoj temperaturi alata može smanjiti s 30 % na 5 % ako se umjesto Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja primijeni eksponencijalni zakon očvršćivanja za simulaciju obrade čelika X5CrNiCuNb16-4.



Slika 4.5. Usporedba temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim simulacijama i dobivene eksperimentalnim mjerenjima [5]

Barge i suradnici [108] su zaključili da veličina konačnog elementa kojim se diskretizira volumen obratka ne utječe značajno na predviđanja temperature u zoni rezanja. S druge strane, značajan utjecaj na temperature ima model trenja. Filice i suradnici [56] su istražili tri različita modela trenja te različite vrijednosti Coulombovog koeficijenta trenja i smičnog koeficijenta trenja za materijal C45U. U usporedbi s eksperimentalnim podacima, greške u predviđanju temperatura u alatu su bile od 1 % do 41 % što ukazuje na veliki značaj pravog odabira modela trenja i vrijednosti koeficijenata trenja.

U većini radova je pretpostavljeno da udio topline koja nastaje zbog trenja i koja odlazi u obradak je 50 % [29], [44], [46], [83], [109] te utjecaj tog koeficijenta nije detaljnije istražen.

Pervaiz [28] je optimizirao koeficijent prijelaza topline između alata i okoline s ciljem što manjeg odstupanja eksperimentalnih i numeričkih rezultata temperature rezanja pri suhoj obradi Ti-6Al-4V materijala. Optimizacijom koeficijenta, najveća pogreška pri najvećoj brzini rezanja (120 m/min) se smanjila s 22,5 % na 15 %. Sličnu metodu su primijenili Kanellos i suradnici [110] pri simulaciji obrade istog materijala. U navedenom radu je za kriterij

konvergencije koeficijenta prijelaza topline postavljen uvjet da razlika između nove i prethodne vrijednosti koeficijenta ne smije biti veća od neke određene vrijednosti.

Zbog kratkog vremena obrade koji se razmatra u simulacijama, većina znanstvenika pretpostavlja da ne dolazi do prijelaza topline s obratka na okolinu i /ili s alata na okolinu i obratno. Međutim, ako se razmatraju zaostala naprezanja ili obrade u kojima se koristi sredstvo za hlađenje, koeficijent prijelaza topline se ne zanemaruje. Njegova vrijednost ovisi o uvjetima obrade i materijalu te su uočene velike varijacije vrijednosti koje su korištene u radovima: 20 W/m<sup>2</sup>K [111], 200 W/m<sup>2</sup>K [28], [110], [112], 3100 W/m<sup>2</sup>K [113], 10 000 W/m<sup>2</sup>K [114] te 1 000 kW/ m<sup>2</sup>K [62], [115].

Iako je nužno validirati bilo koju simulaciju eksperimentalnim podacima, u malom broju radova su uspoređeni numerički rezultati predviđanja temperature s eksperimentalnim podacima. Razlog tome je što je zahtjevno mjeriti temperature tijekom same obrade. U radovima su prikazane eksperimentalno mjerene temperature pomoću termopara [5], [56], [103], [116], [117] ili pomoću infracrvene (termalne) kamere [94], [114], [118].

### **4.3. Primjena spregnute Euler-Lagrangeova (CEL) formulacije u predviđanju izlaznih veličina**

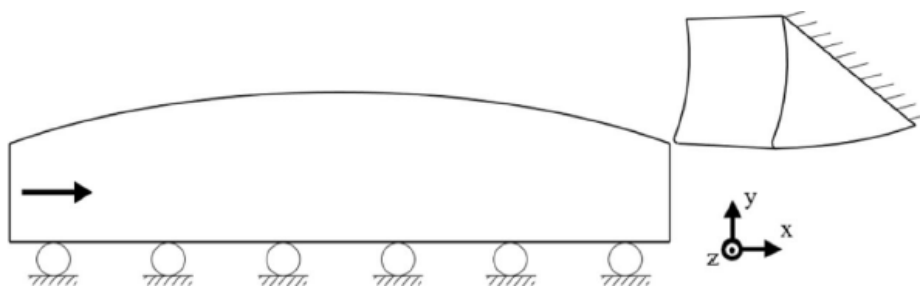
Spregnuta Euler-Lagrangeova (CEL) formulacija za simulaciju obrade odvajanjem čestica se počela primjenjivati tek u posljednjih nekoliko godina.

Zhang i suradnici [45] su zaključili da ovisno o formulaciji koja se primjenjuje, potrebno je prilagoditi vrijednosti parametara JC zakona očvršćivanja za obradak materijala Ti-6Al-4V. Abdelhafeez i suradnici [119] su usporedili Lagrangeovu formulaciju i CEL formulaciju za predviđanje glavne sile rezanja i momenta u postupku bušenja. Model se sastojao od trodimenzionalnog svrdla te od trodimenzionalnog obratka različitih aluminijevih legura (EN AW 7010, EN AW 2024) i legure titana (Ti-6Al-4V). Obje formulacije su predvidjele približno jednake rezultate (odstupanja u usporedbi s eksperimentom do 19 %). Međutim, Lagrangeova formulacija je zahtijevala dvostruko više vremena za provedbu simulacije u odnosu na CEL formulaciju. U svom radu Klocke i suradnici [49] su simulirali ortogonalno rezanje Ti-6Al-4V legure. Za različite prednje kutove alata su usporedili maksimalne i minimalne vrijednosti glavne sile rezanja te su odstupanja između eksperimentalnih podataka



i numeričkih simulacija do 35 %. Saez-de-Buruaga i suradnici [120] su potvrdili da CEL formulacija lošije predviđa posmične sile u odnosu na glavne sile rezanja za čelike C45 i C60. Tako su odstupanja za glavnu silu rezanja do 30 %, a za posmičnu silu do 42 %. Veća odstupanja su za manju dubinu rezanja i kod predviđanja temperatura rezanja. Maksimalno odstupanje je 21 % između numeričkih predviđanja i eksperimentalnih podataka mjerenih termalnom kamerom. Shuang i suradnici [121] su zaključili da značajniji utjecaj na rezultate simulacija ima veličina elementa od same orijentacije elemenata kojim se diskretizira volumen obratka. U tom radu simulirali su ortogonalno rezanje legure Ti-6Al-4V primjenom CEL formulacije. U radu Abouridouanea i suradnici [122] uočena su odstupanja u vrijednostima glavne sile rezanja (eksperimentalna i numerička analiza) do 14 %, a posmične sile do 20 % za čelik C60.

Agmell i suradnici su primijenili CEL formulaciju za predviđanje raspodjele temperature na alatu za obradak X2 CrNiMo17 12-3 [115] te leguru nikla Inconel 718 [62]. Rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem su odstupali do 30 % u odnosu na mjerenja termalnom kamerom. S ciljem simuliranja obrade s promjenjivim poprečnim presjekom odvojene čestice Gao i suradnici su za leguru EN AW 6061 T6 [123] i nehrđajući čelik 440C [124] primijenili sinusoidan oblik obratka, Slika 4.6.



Slika 4.6. Izgled alata i obratka [123]

Afsharhanaei i suradnici [125] su zaključili da je glavna sila rezanja manja za veću dubinu rezanja (0,06 mm) pri ortogonalnom rezanju čelika C45U. Temperature na prednjoj površini alata nisu uspoređene s eksperimentalnim podacima, ali su numeričke simulacije prikazale porast temperature na vrhu rezne oštrice alata s porastom brzine rezanja. Također je uočeno da dubina rezanja nema značajan utjecaj na spomenutu temperaturu. S obzirom na to da duljina dodira između alata i odvojene čestice također ima važnu ulogu u modeliranju sila rezanja, Berezvai i suradnici [126] su primijenili CEL formulaciju za predviđanje iste. Pri ortogonalnom

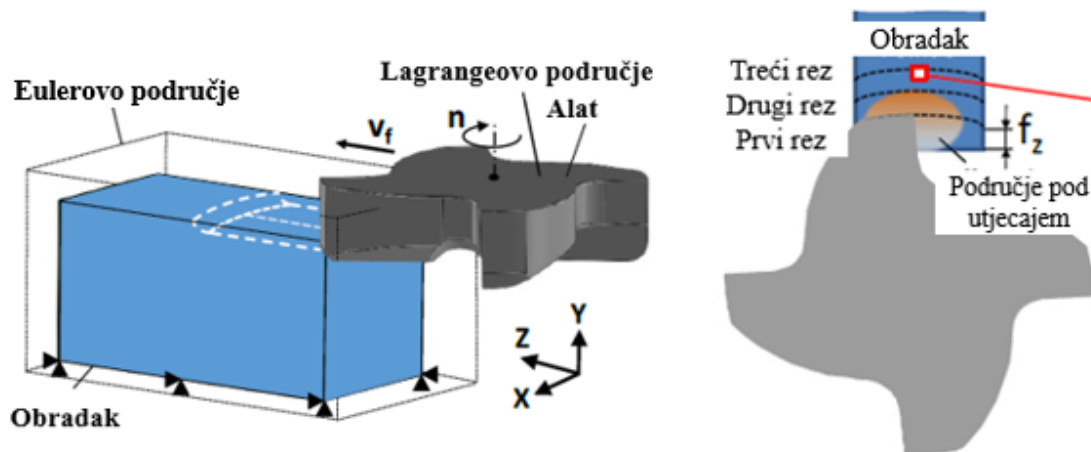
rezanju aluminijske legure (EN AW 2024 T351) povećanjem dubine rezanja dolazi i do porasta maksimalnih vrijednosti duljina dodira. Spomenute duljine predviđene numeričkom analizom su bile u skladu s dobivenim eksperimentalnim podacima. Peng i suradnici [50] su primijenili CEL formulaciju za simuliranje ortogonalnog rezanja legure nikla. U svom radu su proučavali utjecaj trošenja alata na sile rezanja. Širinu pojasa trošenja na stražnjoj površini alata su mjerili eksperimentalno te su tu vrijednost primijenili u modeliranju alata. Nakon primjene modela alata u kojemu je uzet u obzir pojas trošenja alata, u simulaciji su uočena značajna poboljšanja u predviđanjima i glavne i posmične sile rezanja. Pogreška u predviđanju posmične sile (za određenu kombinaciju ulaznih parametara) se smanjila sa 51 % na 2 %. U istraživanju Bergs i suradnici [51] modelirana je i presvlaka (TiAlN) alata debljine 4  $\mu\text{m}$  pri ortogonalnom rezanju čelika C45U. Usporedili su eksperimentalne rezultate i rezultate numeričkih simulacija glavne sile rezanja i posmične sile za različite dubine rezanja i brzine rezanja. Glavna sila rezanja odstupala je do 21 %, međutim posmična sila do čak 264 %. Za razliku od ostalih radova, Dimopoulos i suradnici [127] su primijenili 3D CEL model za simulaciju rezanja čelika C60, Slika 4.7. U ovom radu je simulirano koso rezanje te su razmatrane glavna sila rezanja, posmična sila te sila prodiranja. Autori su naveli da su numerička predviđanja spomenutih sila u skladu s eksperimentalnim podacima iako su odstupanja posmične sile i do 100 %.



Slika 4.7. Shematski prikaz rezne pločice i obratka [127]

Utjecaj prednjeg kuta rezne oštrice alata te radijusa zaobljenja vrha alata na temperature u zoni rezanja su proučavali Liu i suradnici [66]. Primjenom CEL formulacije simulirali su ortogonalno rezanje legure nikla Inconel 718. Veća temperatura se javlja kod negativnog prednjeg kuta alata te kod većeg radijusa zaobljenja oštrice alata. Odstupanje maksimalne temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim simulacijama u usporedbi s mjerenjima termalnom kamerom je do 27 %. Slično vrijedi i za vrijednosti zaostalih naprezanja. Veće vrijednosti tlačnih zaostalih naprezanja se javljaju za negativan prednji kut rezne oštrice alata.

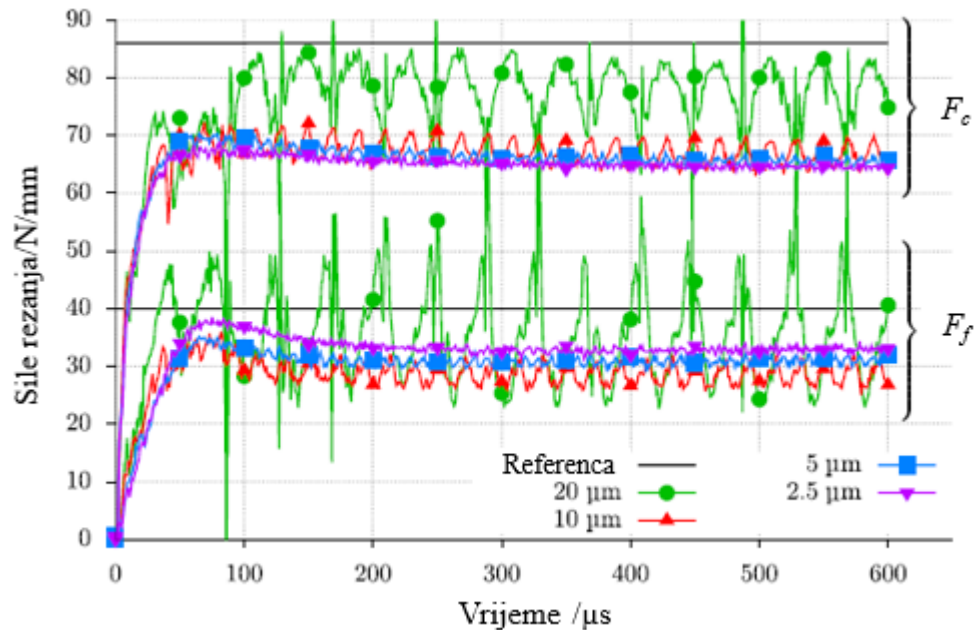
Postupnim povećanjem radijusa zaobljenja oštrice alata prvo dolazi do povećanja maksimalne vrijednosti tlačnog zaostalog naprezanja. Daljnjim povećanjem radijusa dolazi do smanjenja maksimalne vrijednosti. Uzrok je taj što prelaskom iz oštrog u zaobljeni dio alata dolazi do većeg vlačnog naprezanja po dubini materijala. Vovk i suradnici [52] su za pojednostavljeni 3D model glodanja razmatrali tri prolaza alata, Slika 4.8. Odstupanja glavne sile rezanja između numeričkih predviđanja i eksperimentalnih podataka su bila unutar 5 % za 42CrMoS4.



Slika 4.8. Shematski prikaz glodala i obratka [52]

Najveći doprinos u području numeričkih simulacija obrade odvajanjem čestica primjenjujući CEL formulaciju je dao Ducobu sa suradnicima. U 2016. godini su usporedili ALE i CEL formulaciju u pogledu predviđanja glavne sile rezanja i posmične sile [46]. Iako su primjenom ALE formulacijom predviđeni rezultati sličniji eksperimentalnim (bolji rezultati do 10 % u odnosu na CEL formulaciju), vrijeme potrebno za provedbu simulacije je bilo za oko 25 % veće u odnosu na CEL formulaciju. Obradak je bio legura Ti-6Al-4V. Sljedeće godine su usporedili četiri različita programska paketa odnosno formulacije [128]. Zaključili su da CEL formulacija može konkurirati ostalim već dugo korištenim formulacijama. Također, primjenom ALE i CEL formulacije su predviđeni precizniji rezultati glavne sile rezanja i posmične sile u odnosu na Lagrangeovu formulaciju u AdvantEdge i DEFORM programskim paketima. Iste godine autori su istraživali utjecaj vrijednosti parametara Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja [129]. U simulacijama i eksperimentalnim istraživanjima također je korišten Ti-6Al-4V materijal, a dubina rezanja je bila konstantna (0,06 mm). Također je primijenjena CEL formulacija. Korišteno je čak 20 različitih skupova parametara JC zakona očvršćivanja. Za većinu JC modela je predviđena posmična sila manja u odnosu na eksperimentalne podatke.

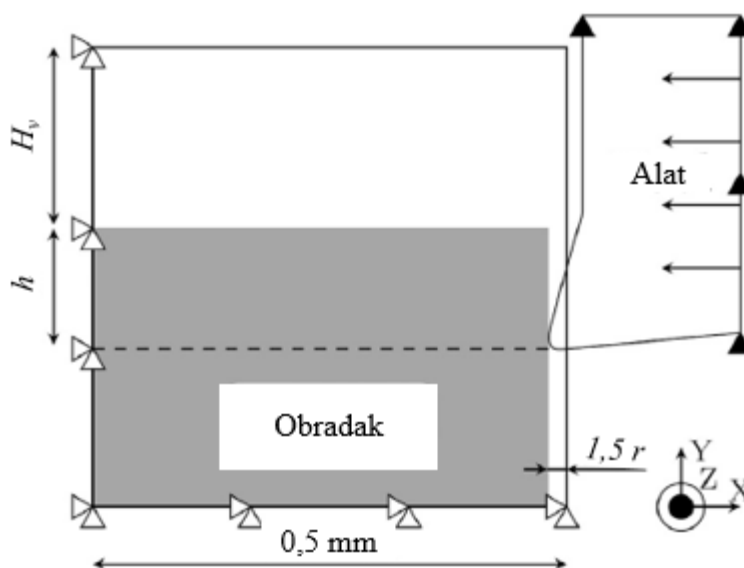
Odstupanja variraju od 3 % do čak 67 %. Iako je glavna sila rezanja bolje predviđena, ovisno o skupu parametara JC zakona i ta odstupanja su od 0 % do 89 %. U drugom radu [130] autori su istraživali utjecaj veličine konačnih elemenata (kvadratni elementi na obratku veličine 2,5  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  te 20  $\mu\text{m}$ ) na rezultate simulacija, Slika 4.9.



Slika 4.9. Utjecaj veličine kvadratnog elementa u ravnini rezanja na predviđanja sila rezanja u numeričkim simulacijama [130]

U fokus istraživanja prvo su stavili veličinu elementa u ravnini rezanja ( $xy$  ravnini). Iako s veličinom kvadratnog elementa od 20  $\mu\text{m}$  se postižu najbliži rezultati eksperimentalnim vrijednosti, za ovaj slučaj sile ne dostižu konstantnu vrijednost. Autori su preporučili primjenu kvadratnih elemenata veličine stranica 5  $\mu\text{m}$  (u ravnini rezanja). S druge strane zaključili su da orijentacija elemenata ima značajan utjecaj na rezultate simulacija. U trećem dijelu ovog rada, autori su se bavili proučavanjem utjecaja veličine i broja konačnih elemenata kojim se diskretizira obradak u smjeru okomitom na ravninu rezanja (smjer osi  $z$ ). Zaključili su da niti broj elemenata u  $z$  smjeru niti veličina elementa u tom smjeru nema utjecaj na rezultate simulacija. S obzirom na to da je manje vremena potrebno za provedbu simulacija u slučaju kad je ukupni broj elemenata manji, autori su se odlučili za primjenu jednog elementa u  $z$  smjeru i to veličine od 50  $\mu\text{m}$ . U opsežnom istraživanju, Ducobu i suradnici [131] su usporedili CEL formulaciju s 4 različita modela obratka. Iako je u svim modelima veličina konačnog elementa kojim se diskretizira obradak u smjeru osi  $x$  i smjeru osi  $y$  5  $\mu\text{m}$ , glavne razlike u

modelima su u pogledu veličine modela u smjeru  $z$  osi (smjeru okomitom na ravninu rezanja). Za predviđanje glavne sile rezanja i posmične sile uspoređen je 2D model te 3D modeli. 2D model je predvidio rezultate obje sile sličnije eksperimentima u odnosu na 3D modele. Također su zaključili da veličina elementa značajno utječe na rezultate simulacija. S ciljem smanjenja broja Eulerovih elemenata, autori su proučavali i utjecaj visine ispunjene prazninom ( $H_V$ ), Slika 4.10. Zaključili su da se može smanjiti broj elemenata inicijalno ispunjenih prazninom bez utjecaja na rezultate simulacija.



Slika 4.10. Izgled alata i obratka [131]

Iz prethodnih radova može se uočiti da su Ducobu i suradnici u fokus stavili ortogonalno rezanje legure titana. Kratko istraživanje su posvetili i primijeni CEL formulacije za simulaciju ortogonalnog rezanja legure EN AW 2024 T3 [109]. U ovom radu su zbog velikih odstupanja posmične sile rezanja (60 %) zaključili da je potrebno detaljnije istražiti modeliranje obrade aluminija s primjenom CEL formulacije. Može se zaključiti da je važno proučiti primjenjivost CEL formulacije za predviđanja razmatranog postupka i za druge materijale (npr. Al-legure).

Liu i suradnici [132] su predstavili da numerički model gdje je primijenjena CEL formulacija predviđa dovoljno točno glavne sile rezanja prilikom obrade legure nikla (Inconel 718), ali su odstupanja u predviđanjima posmične sile čak do 51 %. Xu i suradnici [133] su za istu leguru numeričkom analizom predvidjeli glavnu silu i posmičnu silu rezanja s do 10 % odstupanja u odnosu na eksperimentalne rezultate ortogonalnog rezanja. Također su numeričkom i eksperimentalnom analizom (mjerenjem pomoću termalne kamere) potvrdili da se s

negativnim prednjim kutom alata javljaju veće temperature u zoni rezanja. Odstupanja eksperimentalnih i numeričkih rezultata maksimalne temperature u zoni rezanja je unutar 10 % za sva tri slučaja prednjeg kuta alata. Schraknepper i suradnici [134] su primijenili CEL formulaciju za predviđanje zaostalih naprezanja u alatu od tvrdog metala nakon ortogonalnog rezanja legure nikla (Inconel 718) te su zaključili da je potrebno optimizirati parametre zakona očvršćivanja s ciljem povećanja točnosti simulacija. Liu i suradnici [135] su za leguru Ti-6Al-4V primjenom modificiranog JC zakona preciznije predvidjeli glavnu silu rezanja (prosječno odstupanje 4,96 %) i posmičnu silu (prosječno odstupanje 13,3 %) u odnosu na JC model (prosječno odstupanje glavne sile rezanja 15,7 % te posmične sile 14,96 %). Razmatrajući istu leguru, Xu i suradnici [136] su proveli detaljno istraživanje. Optimizirali su veličinu elementa za CEL formulaciju te su zaključili da je 3,5  $\mu\text{m}$  optimum u pogledu predviđanja sila rezanja, oblika odvojene čestice te vremena trajanja simulacija. Također su zaključili da CEL formulacija može bolje predvidjeti deformacije te duljine dodira alata i obratka u odnosu na Lagrangeovu formulaciju te da primjenom predstavljenog modificiranog zakona očvršćivanja mogu se predvidjeti bolje sile rezanja (odstupanje do 5 %) te oblik odvojene čestice (odstupanje do 40 %) u odnosu na JC zakon. Predstavljeni model bolje predviđa stvarno ponašanje Ti6-Al4-V legure. 3D model svrdla i obratka (C45) je primijenjen u CEL simulaciji u radu Priest i suradnici [137]. Iako se numerička predviđanja sile rezanja i momenta razlikuju do 20 % u odnosu na eksperimentalne podatke, značajna prednost CEL formulacije je što nije potrebno uklanjanje elemenata prilikom nastanka odvojene čestice. Khochtali i suradnici [138] su došli do sličnog zaključka; JC zakon očvršćivanja ne može dobro opisati ponašanje Ti17 legure te taj model mora biti unaprijeđen. Zhang i Choi [139] su predstavili da Lagrangeova formulacija bolje previđa izgled odvojene čestice u odnosu na ALE i CEL formulaciju prilikom simulacije ortogonalnog rezanja Ti6-Al4-V i EN AW 2024 T351 legura. S druge strane Zhou i suradnici [140] su zaključili da rezultati u pogledu izgleda odvojene čestice odgovaraju eksperimentalnim rezultatima. Primijenjena je CEL formulacija za simulaciju ortogonalnog rezanja legure nikla (Inconel 718). Chaabani i suradnici [141] su usporedili bezmrežni model te modele temeljene na metodi konačnih elemenata (Lagrangeova formulacija, ALE i CEL formulacije) za predviđanje sila rezanja i izgleda odvojene čestice u procesima mikro obrade (dubina rezanja 4  $\mu\text{m}$ ). Primjenom CEL formulacije postignuti su rezultati najbližiji eksperimentalnim vrijednostima za 41NiCrMo7. Odstupanja posmične sile su 29 %. Liu i suradnici [142] su predstavili da se primjenom CEL formulacije mogu dobro predvidjeti sile

ortogonalnog rezanja za X2CrNiMo17 12-3. Međutim odstupanja posmične sile su do 62,5 % u odnosu na eksperimentalne rezultate.

Radovi koji su u simulacijama obrade odvajanjem čestica primijenili spregnutu Euler-Lagrangeovu formulaciju su sumirani u Tablici 4.1. U Tablici 4.1 su prikazane i važne informacije o ulaznim parametrima i numeričkim postavkama (materijal obratka i alata, veličina konačnog elementa kojim se diskretizira volumen obratka, zakon očvršćivanja i model trenja, kriterij za nastajanje odvojene čestice).

Pregledom relevantne dostupne literature može se zaključiti da je obrada odvajanjem čestica iznimno složen proces zbog čega još uvijek postoji potreba za boljim razumijevanjem istog. Također, numeričko modeliranje procesa je zanimljivo istraživačima te je u fokusu mnogih znanstvenih radova s ciljem ostvarenja novih spoznaja. Može se zaključiti da programski paketi za analizu metodom konačnih elemenata imaju određene prednosti, ali i određene nedostatke. Nedostaci mogu stvarati značajne prepreke u pogledu modeliranja obrade odvajanjem čestica te simulacije ovih procesa zahtijevaju posebnu pažnju. U posljednjih nekoliko godina znanstvenici primjenjuju CEL formulaciju za simuliranje ortogonalnog rezanja određenih materijala. Više autora se složilo da je CEL formulacija izrazito moćan alat te može konkurirati već dugo korištenim formulacijama. Pregledom navedene literature može se zaključiti da su u većini radova gdje se primijenila CEL formulacija, u fokus stavljeni materijali Ti-6Al-4V i Inconel 618. Postoji veliki istraživački prostor u pogledu proučavanja aluminijskih i magnezijevih legura. Kako bi se ostvarila veća preciznost predviđanja numeričkih simulacija, nužno je pravilno definirati sve ulazne parametre i numeričke postavke, a pogotovo primijeniti pouzdan zakon očvršćivanja. Odabir zakona očvršćivanja ovisi o materijalu obratka (njegovim svojstvima) i stupnju opterećenja. Model trenja između alata i obratka je također izrazito važan model s obzirom na to da utječe, između ostalog, i na sile rezanja te toplinu generiranu u zoni rezanja. Nadalje, usporedbom numeričkih i eksperimentalnih podataka može se zaključiti o opravdanosti korištenja numeričkih modela i zakonitosti primijenjenih u modelima. Za očekivati je da će se nakon detaljnog istraživanja CEL formulacija moći primijeniti i na druge materijale koji do sada nisu istraženi što je i prezentirano u nastavku ovog rada.

U sljedećem poglavlju predstavljen je eksperimentalni rad te eksperimentalni rezultati ortogonalnog rezanja aluminijske legure EN AW 6082 T6.

4. Predviđanja izlaznih veličina obrade odvajanjem čestica u numeričkim modelima temeljenim na metodi konačnih elemenata

Tablica 4.1. Pregled radova u kojima je primijenjena CEL formulacija za simulaciju obrade odvajanjem čestica

| <b>Autor/literatura</b><br><b>Godina objave</b><br><b>Programski paket</b> | <b>Materijal obratka</b><br><b>Materijal alata</b><br><b>Veličina elementa</b> | <b>Zakon očvršćivanja</b><br><b>Model trenja</b><br><b>Model oštećenja</b>  |
|--|--|---|
| Zhang i dr./[45]<br>2015<br>ABAQUS   | Ti-6Al-4V<br>kruto tijelo  | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Coulombov model trenja<br>JC model inicijacije oštećenja   |
| Abdelhafeez i dr./[119]<br>2016<br>ABAQUS                                  | EN AW 7010,<br>EN AW 2024,<br>Ti-6Al-4V<br>kruto tijelo<br>100 $\mu\text{m}$   | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Zorevljev model trenja<br>JC model inicijacije oštećenja   |
| Ducobu i dr./[46]<br>2016<br>ABAQUS  | Ti-6Al-4V<br>tvrdi metal<br>5 $\mu\text{m}$                                    | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Coulombov model trenja   |
| Ducobu i dr./[128],<br>[129], [131]<br>2017, ABAQUS                        | Ti-6Al-4V<br>tvrdi metal<br>5 $\mu\text{m}$                                    | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Coulombov model trenja   |
| Ducobu i dr./[130]<br>2017<br>ABAQUS                                       | Ti-6Al-4V<br>tvrdi metal<br>2,5 $\mu\text{m}$ – 20 $\mu\text{m}$               | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Coulombov model trenja   |
| Klocke i dr./[49]<br>2017<br>ABAQUS  | Ti-6Al-4V<br>kruto tijelo<br>6 $\mu\text{m}$                                   | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Temperaturno ovisan Coulombov koeficijent<br>JC model inicijacije oštećenja<br>Ekvivalentni plastični pomak – razvoj oštećenja |
| Buruaga i dr./[120]<br>2017<br>ABAQUS                                      | C45, C60   | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Coulombov model trenja   |
| Shuang i dr./[121]<br>2017<br>ABAQUS                                       | Ti-6Al-4V<br>kruto tijelo  | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>TANH zakon očvršćivanja<br>Koeficijent trenja koji ovisi o brzini rezanja  |
| Agmell i dr./[115]<br>2018<br>ABAQUS                                       | X2CrNiMo17 12-3<br>CBN170<br>10 $\mu\text{m}$                                  | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Coulombov model trenja<br>JC model inicijacije oštećenja<br>Energija loma – razvoj oštećenja                                   |
| Gao i dr./[123]<br>2018<br>ABAQUS  | EN AW 6061 T6<br>kruto tijelo<br>5 $\mu\text{m}$                               | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja bez<br>utjecaja temperature<br>Zorevljev model trenja   |
| Abouridouane i dr./[122]<br>2019, ABAQUS                                   | C60<br>kruto tijelo  | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Zorevljev model trenja<br>JC model inicijacije oštećenja   |
| Berezvai i dr./[126]<br>2019<br>ABAQUS                                     | EN AW 2024<br>T351<br>kruto tijelo<br>7 $\mu\text{m}$                          | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Coulombov koeficijent trenja<br>JC model inicijacije oštećenja<br>Energija loma – razvoj oštećenja                             |



4. Predviđanja izlaznih veličina obrade odvajanjem čestica u numeričkim modelima temeljenim na metodi konačnih elemenata

Tablica 4.1. (nastavak) Pregled radova u kojima je primijenjena CEL formulacija za simulaciju obrade odvajanjem čestica

| <b>Autor/literatura</b><br><b>Godina objave</b><br><b>Programski paket</b> | <b>Materijal obratka</b><br><b>Materijal alata</b><br><b>Veličina elementa</b> | <b>Zakon očvršćivanja</b><br><b>Model trenja</b><br><b>Model oštećenja</b>  |
|--|--|---|
| Ducobu i dr./[109]<br>2019<br>ABAQUS                                       | EN AW 2024 T3<br>tvrdi metal<br>5 $\mu\text{m}$                                | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Coulombov koeficijent trenja<br>Bao-Wierzbicki model inicijacije oštećenja<br>Energija loma – razvoj oštećenja                 |
| Peng i dr./[50]<br>2019<br>ABAQUS  | Inconel 718<br>kruto tijelo<br>2 $\mu\text{m}$                                 | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Temperaturno ovisan Coulombov koeficijent<br>JC model inicijacije oštećenja<br>Ekvivalentni plastični pomak - razvoj oštećenja |
| Bergs i dr./[51]<br>2020<br>ABAQUS   | C45<br>kruto tijelo s<br>presvlakom<br>5 $\mu\text{m}$ - 50 $\mu\text{m}$      | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Temperaturno ovisan Coulombov koeficijent<br>trenja  |
| Agmell i dr./[62]<br>2020<br>ABAQUS  | Inconel 718<br>CBN170<br>5 $\mu\text{m}$                                       | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Coulombov model trenja<br>JC model inicijacije oštećenja<br>Energija loma – razvoj oštećenja                                   |
| Dimopoulos i<br>dr./[127]<br>2020, ABAQUS                                  | C60  | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Coulombov model trenja   |
| Vovk i dr./[52]<br>2020<br>ABAQUS  | 42CrMoS4<br>kruto tijelo<br>5 $\mu\text{m}$                                    | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Zorevljev model trenja   |
| Liu i dr./[66]<br>2020<br>ABAQUS   | Inconel 718<br>kruto tijelo<br>5 $\mu\text{m}$                                 | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Zorevljev model trenja<br>JC model inicijacije oštećenja<br>Energija loma – razvoj oštećenja                                   |
| Gao i dr./[124]<br>2020<br>ABAQUS  | 440C<br>Kruto tijelo<br>3 $\mu\text{m}$ - 5 $\mu\text{m}$                      | Zorevljev model trenja  |
| Liu i dr./[132]<br>2021<br>ABAQUS  | Inconel 718<br>kruto tijelo<br>5 $\mu\text{m}$                                 | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Zorevljev model trenja<br>JC model inicijacije oštećenja<br>Energija loma – razvoj oštećenja                                   |
| Xu i dr./[133]<br>2021<br>ABAQUS   | Inconel 718<br>Tvrdi metal<br>5 $\mu\text{m}$                                  | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Zorevljev model trenja<br>JC model inicijacije oštećenja<br>Energija loma – razvoj oštećenja                                   |
| Schraknepper i<br>dr./[134]<br>2021<br>ABAQUS                              | Inconel 718<br>Tvrdi metal   | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Temperaturno ovisan Coulombov koeficijent<br>JC model inicijacije oštećenja<br>Ekvivalentni plastični pomak – razvoj oštećenja |
| Liu i dr./[135]<br>2021, AdvantEdge  | Ti-6Al-4V  | JC i izmijenjeni JC zakon očvršćivanja<br>Coulombov koeficijent trenja  |

4. Predviđanja izlaznih veličina obrade odvajanjem čestica u numeričkim modelima temeljenim na metodi konačnih elemenata

Tablica 4.1. (nastavak) Pregled radova u kojima je primijenjena CEL formulacija za simulaciju obrade odvajanjem čestica

| <b>Autor/literatura</b>                | <b>Materijal obratka</b>  | <b>Zakon očvršćivanja</b>   |
|--|---|---|
| <b>Godina objave</b>                   | <b>Materijal alata</b>  | <b>Model trenja</b>   |
| <b>Programski paket</b>                | <b>Veličina elementa</b>  | <b>Model oštećenja</b>  |
| Xu i dr./[136]<br>2021<br>ABAQUS       | Ti-6Al-4V<br>Tvrđi metal<br>3,5 $\mu\text{m}$                                       | JC i izmijenjeni JC zakon očvršćivanja<br>Zorevljev model trenja<br>JC i izmijenjeni JC model inicijacije oštećenja<br>Energija loma – razvoj oštećenja |
| Priest i dr./[137]<br>2021<br>ABAQUS   | C45<br>Tvrđi metal<br>60 $\mu\text{m}$  | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Zorevljev model trenja<br>JC model inicijacije oštećenja<br>Ekvivalentni plastični pomak – razvoj oštećenja        |
| Khochtall i dr./[138]<br>2021, ABAQUS  | Ti17<br>Tvrđi metal   | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>JC model inicijacije oštećenja   |
| Zhang i Choi./[139]<br>2021<br>ABAQUS  | EN AW 2024 T351<br>Ti-6Al-4V<br>kruto tijelo<br>10 $\mu\text{m}$ - 20 $\mu\text{m}$ | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Zorevljev model trenja<br>JC model inicijacije oštećenja<br>Energija loma – razvoj oštećenja                       |
| Zhou i dr./[140]<br>2022<br>ABAQUS     | Inconel 718<br>kruto tijelo<br>8 $\mu\text{m}$                                      | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>JC model inicijacije oštećenja<br>Ekvivalentni plastični pomak – razvoj oštećenja                                  |
| Chaabani i dr./[141]<br>2022<br>ABAQUS | 41NiCrMo7<br>kruto tijelo   | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Coulombov model trenja<br>JC model inicijacije oštećenja   |
| Liu i dr./[142]<br>2023<br>ABAQUS      | X2CrNiMo17 12-3<br>kruto tijelo<br>8 $\mu\text{m}$                                  | Johnson-Cookov zakon očvršćivanja<br>Zorevljev model trenja<br>JC model inicijacije oštećenja i energija loma   |

## 5. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni dio rada obavljen je u Laboratoriju za alatne strojeve na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu. Cilj je bio dobiti rezultate mjerenja koji će omogućiti provjeru postavljene hipoteze. Eksperimentalna ispitivanja izvedena su u dva dijela. U prvom dijelu eksperimentalnog ispitivanja izlazne veličine koje su razmatrane u postupku ortogonalnog rezanja su: glavna sila rezanja  $F_c$ , posmična sila  $F_f$  i temperatura u zoni rezanja  $T$ . Ova skupina eksperimenata je obavljena s ciljem optimizacije ortogonalnog rezanja te validacije rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem.

U drugom dijelu eksperimentalnog ispitivanja izlazne veličine koje su razmatrane u postupku tokarenja su komponente sile rezanja  $F_c$ ,  $F_f$  i  $F_p$  (sila prodiranja), poglavlje 11. Ova skupina eksperimenata je obavljena s ciljem validacije hibridne metode, a detaljniji opis je u poglavlju 11.

### 5.1. Sredstva i uvjeti eksperimenata

Svi eksperimenti su izvedeni na univerzalnoj tokarilici D420/1500 bez uporabe sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. U nastavku su opisani elementi sustava potrebni za izvođenje eksperimenata: alatni stroj, alat, obradak te mjerna oprema.

#### 5.1.1. Alatni stroj

Postupci ortogonalnog i kosog rezanja su izvedeni na univerzalnoj tokarilici, Slika 5.1. Osnovne karakteristike stroja dane su u Tablici 5.1.



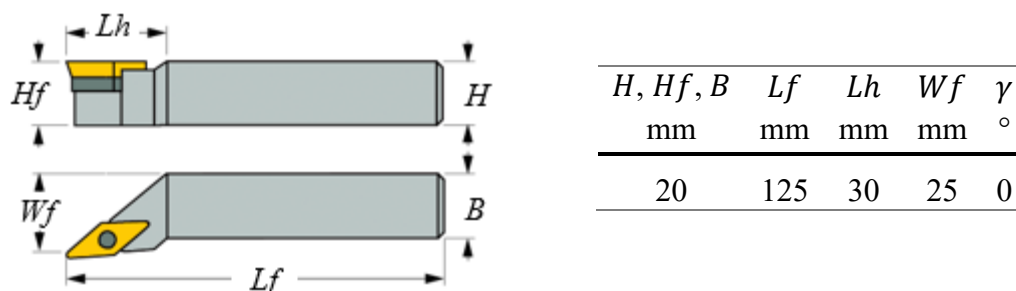
Slika 5.1. Univerzalna tokarilica

Tablica 5.1. Glavne karakteristike univerzalne tokarilice

| Univerzalna tokarilica D420/1500           |   |
|--|---|
| Broj mogućih brzina vrtnje glavnog vretena | 24  |
| Broj okretaja glavnog vretena              | 11,2 min <sup>-1</sup> - 2240 min <sup>-1</sup> |
| Broj ostvarivih posmaka                    | 32  |
| Uzdužni posmaci                            | 0,045 mm/o - 1,6 mm/o                           |
| Poprečni posmaci                           | 0,02 mm/o - 0,71 mm/o                           |
| Snaga elektromotora                        | 11 kW   |
| Broj okretaja elektromotora                | 1450 min <sup>-1</sup>                          |

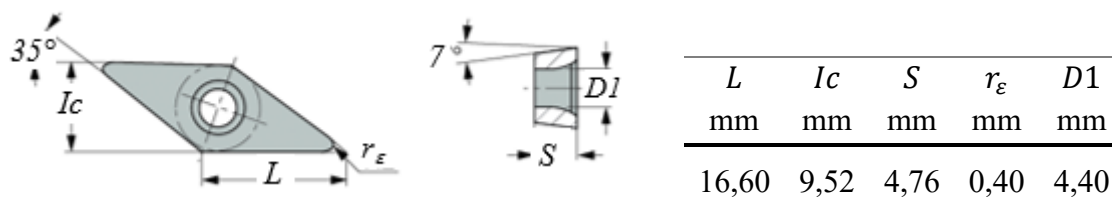
### 5.1.2. Alat i rezne pločice

Alat koji je korišten za eksperimentalno ispitivanju je tokarski nož proizvođača Iscar za vanjsko tokarenje oznake SVJCR 2020K-16 te rezna pločica oznake VCGT 160404-AS. Geometrijske značajke alata prikazane su na Slici 5.2.



Slika 5.2. Tokarski nož

Mehanički izmjenjive rezne pločice VCGT 160404-AS izrađene su od tvrdog metala. Dimenzije rezne pločice dane su na Slici 5.3.



Slika 5.3. Rezna pločica za tokarenje

Oznaka kvalitete pločice je IC20. Prema preporuci proizvođača alata, za materijal (aluminijeva legura) tvrdoće 100 HB vrijednosti parametara obrade za odabranu reznu pločicu su:

$$v_c = 150 \text{ m/min} - 2500 \text{ m/min}$$

$$f = 0,05 \text{ mm/o} - 0,25 \text{ mm/o}$$

$$a_p = 0,5 \text{ mm} - 3 \text{ mm.}$$

### 5.1.3. Obradak

Materijal obratka je aluminijeva legura u toplinski očvrnutom stanju oznake EN AW 6082 T6. Aluminij je drugi najkorišteniji metal na zemlji te se isporučuje u različitim oblicima i toplinskim stanjima. Relativno mala vlačna čvrstoća tehnički čistog aluminijskog legura može se značajno poboljšati legiranjem, plastičnim deformacijama te toplinskom obradom. Rastuća proizvodnja i potrošnja aluminijevih legura proizlazi iz njihovih fizikalnih i mehaničkih svojstava te ima veliki ekonomski i ekološki značaj [143]. Legura aluminija EN AW 6082 T6 je legura za gnječenje s bogatijim udjelom Si i Mg. Toplinsko očvršćivanje materijala se postiže postupkom rastopnog žarenja i umjetnog dozrijevanja. Ova legura se zbog male gustoće, srednje čvrstoće i odlične otpornosti na koroziju primjenjuje u industriji transportnih sredstava, kemijskoj industriji, građevinskoj industriji, itd.

Za potrebe eksperimenata pripremljeni su uzorci u obliku cijevi vanjskog promjera 60 mm i duljine 1000 mm. Promjer cijevi je naknadno prilagođen potrebama eksperimenata. Kemijski sastav i mehanička svojstva legure u nabavnom stanju prikazani su u Tablici 5.2.

Tablica 5.2. Kemijski sastav, mehanička i fizikalna svojstva legure EN AW 6082 T6

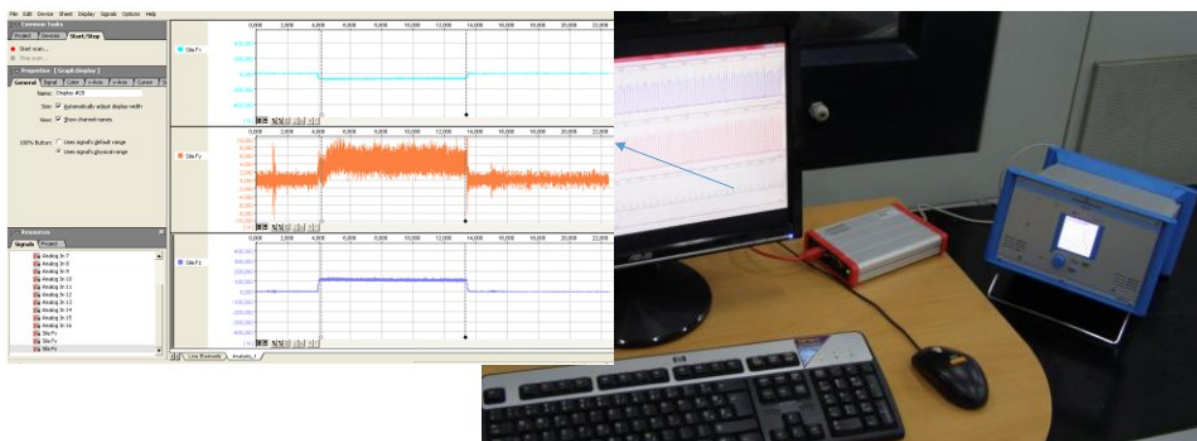
| Kemijski sastav / %             |       |                              |       |   |       |   |       |  |       |               |
|---------------------------------|-------|------------------------------|-------|---|-------|---|-------|--|-------|---------------|
| Si                              | Fe    | Cu                           | Mn    | Mg  | Cr    | Zn  | Ni    | Pb   | Ti    |               |
| 0,430                           | 0,170 | 0,001                        | 0,018 | 0,452   | 0,009 | 0,003   | 0,000 | 0,001  | 0,011 |               |
| Mehanička svojstva              |       |                              |       |   |       |   |       |  |       |               |
| Granica tečenja<br>MPa          |       | Vlačna<br>čvrstoća / MPa     |       | Youngov<br>modul / GPa                        |       | Poissonov<br>koeficijent                              |       | Istezljivost<br>%                                  |       | Tvrdoća<br>HB |
| 177                             |       | 245                          |       | 70  |       | 0,33  |       | 12,5   |       | 81            |
| Fizikalna svojstva [144], [145] |       |                              |       |   |       |   |       |  |       |               |
| Gustoća<br>kg/m <sup>3</sup>    |       | Temperatura<br>tališta<br>°C |       | Specifični<br>toplinski kapacitet<br>J/(kg°C) |       | Koeficijent<br>toplinskog<br>širenja °C <sup>-1</sup> |       | Koeficijent<br>toplinske<br>vodljivosti<br>W/(m°C) |       |               |
| 2700                            |       | 582                          |       | 920   |       | 0,000024  |       | 180  |       |               |

#### 5.1.4. Mjerni uređaji

Za mjerenje izlaznih, zavisno promjenjivih veličina korišteni su: sustav za mjerenje komponenti sile rezanja i sustav za mjerenje temperatura. Za mjerenje i analizu geometrije odvojene čestice korištena je digitalna kamera.

Sustav za mjerenje sila u postupku ortogonalnog i kosog rezanja sastoji se od dinamometra, nabojskog pojačala, kartice za prikupljanje podataka, kabela i softvera za prikupljanje, obradu i spremanje rezultata u digitalnom obliku.

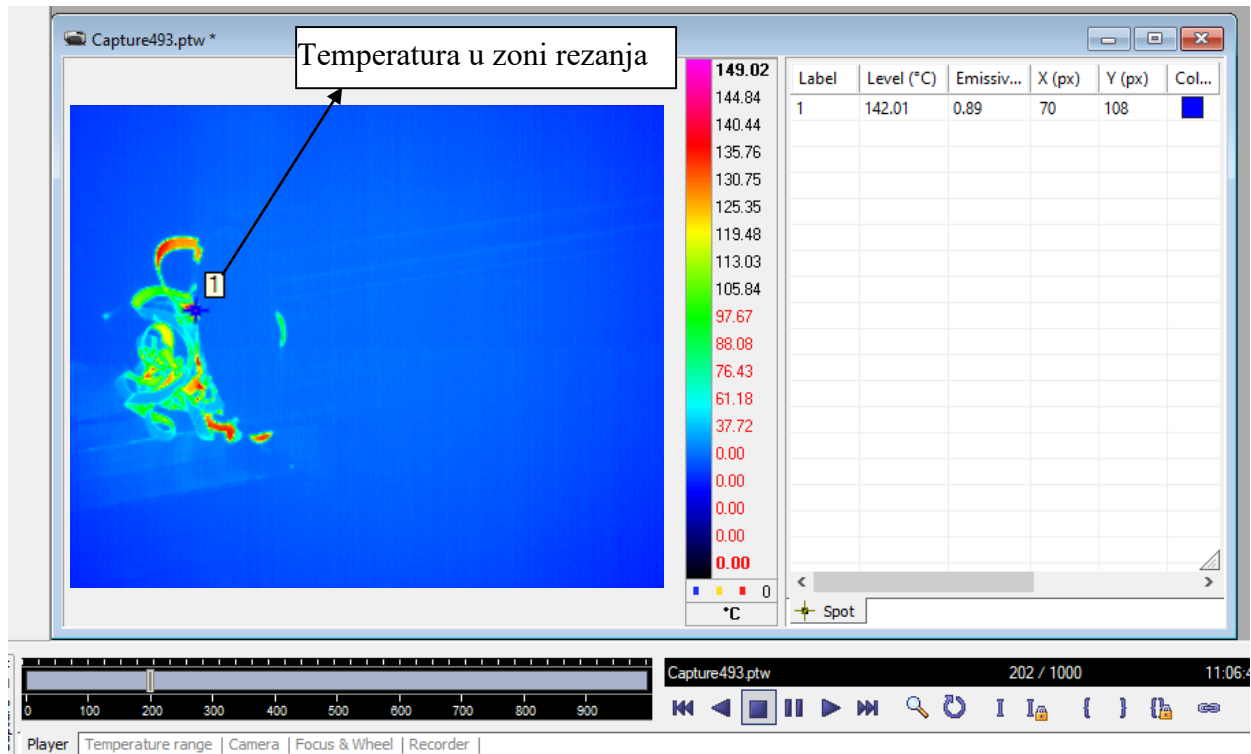
Komponente sile rezanja mjerene su piezoelektričnim trokomponentnim dinamometrom, KISTLER 9275A. Tokarski nož je postavljen na gornju ploču dinamometra. Uslijed djelovanja sila rezanja, generira se električni naboj u dinamometru, koji se prosljeđuje do trokanalnog nabojskog pojačala, KISTLER 5070A, koji naboj pretvara u napon. Prikupljeni analogni signali se dalje procesira pomoću kartice za prikupljanje podataka, USB-AD16F proizvođača BMC Messsysteme, do računala s instaliranim softverom Next View 4.3, Slika 5.4., uz pomoć kojeg su podaci obrađeni i prikazani u grafičkom obliku.



Slika 5.4. Oprema za mjerenje i obradu sila rezanja te grafičko sučelje softvera Next View

Za mjerenje temperature u zoni rezanja korištena je srednjevalna infracrvena kamera FLIR SC 5000, rezolucije  $320 \times 256$  piksela, osjetljivosti  $0,02 \text{ }^\circ\text{C}$  i maksimalne frekvencije prikupljanja podataka od 150 Hz. Ova metoda mjerenja temperature ima mogućnost snimanja toplinskih stanja koja se brzo mijenjaju, mogućnost snimanja predmeta koji se brzo kreću, nema fizičkog dodira uređaja i predmeta čija se temperatura mjeri, može se mjeriti temperatura teško dostupnih predmeta, itd. Za ovu metodu nužno je poznavanje koeficijenta emisije površine predmeta kojem se mjeri temperatura. Koeficijent emisije određen je metodom za mjerenje

pomoću trake čija je emisivnost poznata. Koeficijent emisije za aluminijevu leguru iznosio je 0,89. Za obradu i spremanje izmjerenih temperatura korišten je softver Altair, Slika 5.5.



Slika 5.5. Prikaz rezultata mjerenja infracrvenom kamerom i grafičko sučelje softvera Altair

Zbog porasta temperature tijekom obrade odvajanjem čestica dolazi i do porasta temperature alata. Kako bi se osigurala ponovljivost eksperimenata, početna temperatura alata je jednaka sobnoj temperaturi za sve eksperimente. Navedeno se osiguralo mjerenjem temperature alata pomoću digitalnog multimetra (UT161D) s termoparom tipa *K* čiji je mjerni raspon od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Eksperimentalni postav je prikazan na Slici 5.6.



Slika 5.6. Eksperimentalni postav za mjerenje komponenti sile rezanja i temperature u zoni rezanja



Digitalni USB mikroskop, DINO Lite AM4113ZT, s povećanjem od 200 puta i rezolucijom 1,3 MP, korišten je za mjerenje i analizu geometrije odvojene čestice, Slika 5.7. Nakon svakog eksperimenta, odvojena čestica je vizualno analizirana.

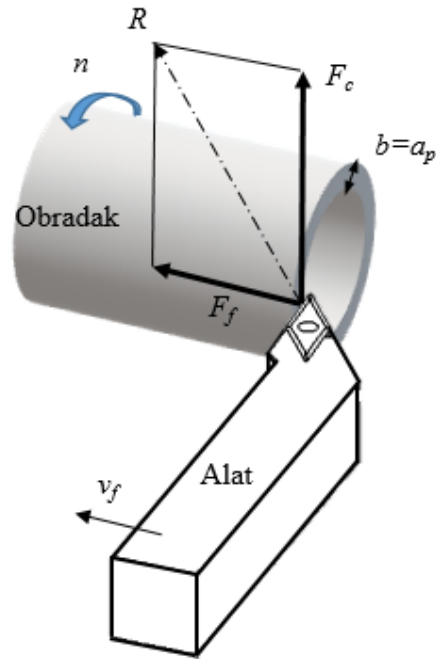


Slika 5.7. Oprema za mjerenje geometrije odvojene čestice

## 5.2. Prethodna ispitivanja

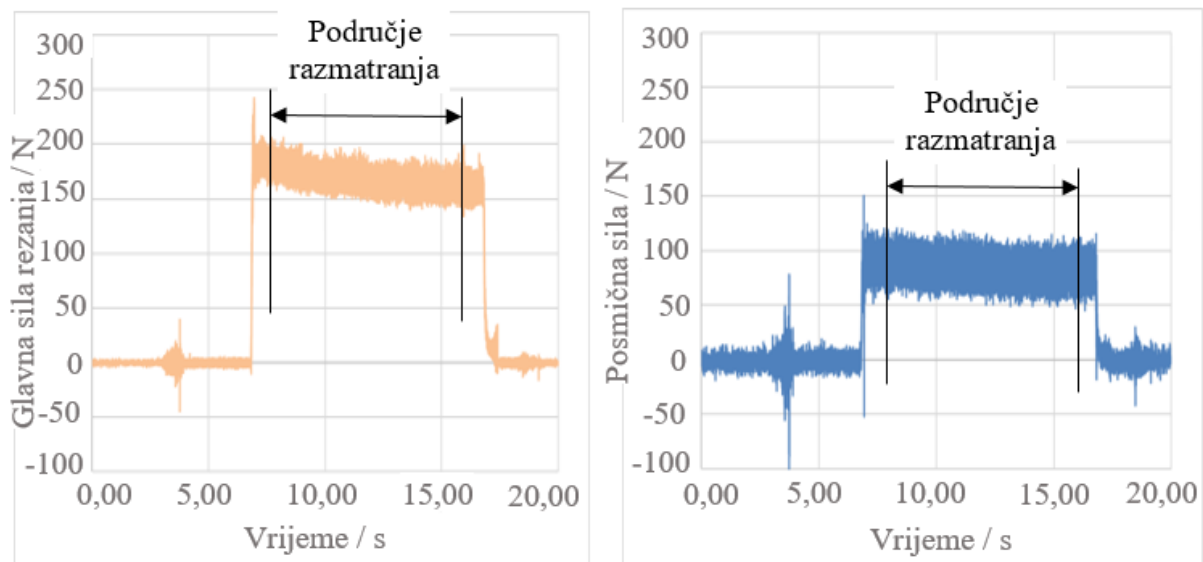
Na osnovu pregleda literature, parametri obrade su odabrani kao ulazne veličine pomoću kojih će se na zadovoljavajući način predvidjeti izlazne veličine u postupku ortogonalnog rezanja. Cilj prethodnih ispitivanja je određivanje utjecajnih parametara obrade tj. dubine rezanja na sile rezanja pri ortogonalnom rezanju.

Provedeni su pokusi ortogonalnog rezanja legure aluminija EN AW 6082 T6. Nužan uvjet ortogonalnog rezanja je da je brzina rezanja okomita na glavnu oštricu i na posmičnu brzinu rezanja. To je ostvareno postavljanjem rezne oštrice okomito na stijenku obratka. Mjerene su glavna sila rezanja ( $F_c$ ) u pravcu brzine rezanja te posmična sila ( $F_f$ ) u pravcu posmičnog gibanja za različite debljine stijenke cijevi, Slika 5.8. Sila  $R$  je rezultanta glavne sile rezanja i posmične sile.



Slika 5.8. Parametri procesa i prikaz sila pri ortogonalnom rezanju

Provedene su dvije grupe eksperimenata. U prvoj grupi je tokarenje cijevi vanjskog promjera 56 mm i debljine stijenke 3 mm ponovljeno 10 puta. U drugoj grupi je tokarenje cijevi vanjskog promjera 54 mm i debljine stijenke 2 mm također ponovljeno 10 puta. Brzina rezanja od 186 m/min i posmak od 0,05 mm/o su korišteni u svim eksperimentima. Na Slici 5.9. prikazane su vrijednosti glavne sile rezanja i posmične sile u funkciji vremena.



Slika 5.9. Sile rezanja u funkciji vremena za prethodna ispitivanja u postupku ortogonalnog rezanja ( $v_c=186$  m/min,  $f=0,05$  mm/o,  $a_p=3$  mm)

Oscilacije u vrijednostima komponenti sile rezanja postoje zbog prisutnih šumova odnosno vibracija tijekom ortogonalnog rezanja. Za svaki eksperiment je potrebno izračunati srednju vrijednost sila rezanja u području gdje je signal stabilan i u području gdje su vrijednosti sila ustaljene. Zbog navedenog, duljina tokarenja u svim eksperimentima je 10 mm.

U Tablici 5.3. prikazani su rezultati eksperimenata za debljinu stijenke 2 mm i 3 mm.

Tablica 5.3. Izmjerene vrijednosti glavne sile rezanja i posmične sile

| $a_p = 2 \text{ mm}$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $F_c / \text{N/mm}$  | 53,93 | 53,22 | 53,05 | 56,19 | 55,68 | 54,45 | 53,71 | 55,77 | 54,25 | 54,89 |
| $F_f / \text{N/mm}$  | 29,75 | 29,53 | 29,45 | 32,64 | 32,78 | 31,21 | 31,41 | 32,89 | 31,59 | 31,92 |
| $a_p = 3 \text{ mm}$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| $F_c / \text{N/mm}$  | 52,68 | 53,11 | 53,39 | 54,41 | 54,30 | 54,96 | 57,74 | 56,27 | 55,94 | 56,57 |
| $F_f / \text{N/mm}$  | 30,55 | 30,70 | 31,67 | 32,18 | 32,59 | 31,56 | 34,97 | 31,44 | 31,27 | 32,47 |

Srednje vrijednosti glavne sile rezanja i posmične sile su prikazane u Tablici 5.4. Za određivanje srednje vrijednosti sila, prvo su eliminirane ekstremne vrijednosti (maksimalne i minimalne vrijednosti) zatim je izračunata aritmetička sredina preostalih osam eksperimenata. Kako bi se ostvarila usporedba eksperimentalnih rezultata i rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem, razmatrane su vrijednosti sila po jediničnoj širini (N/mm). Može se uočiti da se za različite debljine stijenke jedinične sile razlikuju manje od 1 %. Cilj prethodnih ispitivanja je potvrda da debljina stijenke odnosno dubina rezanja nema utjecaj na jediničnu silu rezanja. Stoga, u nastavku istraživanja debljina stijenke nije razmatrana kao utjecajan parametar na jediničnu silu rezanja.

Tablica 5.4. Eksperimentalni rezultati – srednje vrijednosti komponenti sile rezanja

|                      | $F_c$<br>N | $F_f$<br>N | $F_c$<br>N/mm | $F_f$<br>N/mm |
|----------------------|------------|------------|---------------|---------------|
| $a_p = 2 \text{ mm}$ | 109,1      | 64,2       | 54,5          | 31,4          |
| $a_p = 3 \text{ mm}$ | 164,7      | 94,9       | 54,9          | 31,7          |

### 5.3. Planiranje eksperimenata

Planiranjem i vođenjem obrade odvajanjem čestica može se dobiti proizvod visoke kvalitete uz minimalne troškove. To podrazumijeva kontroliranje parametara procesa koji utječu na konačna svojstva proizvoda i trošak procesa. Planiranje eksperimenata predstavlja jedan od osnovnih pristupa istraživanja pojava u procesu koja u konačnici mogu dovesti do novih

saznanja. U ovom radu su brzina rezanja i posmak određeni za ulazne, nezavisno promjenjive veličine. Područje plana eksperimenata određeno je na temelju preporuke proizvođač alata i mogućnosti alatnog stroja. Zbog pretpostavljenih nelinearnosti unutar modela, odabran je centralno kompozitni plan eksperimenata pomoću kojeg će se dobiti matematički modeli. Ovakav plan eksperimenata najčešće se upotrebljava u eksperimentalnom istraživanju, modeliranju i upravljanu višefaktorskim procesima. Matrica plana eksperimenata formira se od kodiranih odnosno fizikalnih vrijednosti parametara. Dvije ulazne veličine na tri razine formiraju plan od 13 eksperimenata s ponavljanjem u nultoj točki zbog određivanja čiste pogreške i zakrivljenosti odzivnih površina u eksperimentalnom prostoru. Odzivne veličine su glavna sila rezanja, posmična sila te temperatura u zoni rezanja. Svaki eksperiment je ponovljen 2 puta te je izračunata srednja vrijednosti odzivnih veličina. Plan eksperimenata je dobiven korištenjem softvera Design Expert, Tablica 5.5. U Tablici 5.5. prikazane su kodirane ( $X1$ ,  $X2$ ) i fizikalne vrijednosti ulaznih parametara. Na temelju prethodnih istraživanja, odabrana je duljina tokarenja 10 mm za sve eksperimente.

Tablica 5.5. Plan eksperimenata za dobivanje modela odzivnih veličina glavne sile rezanja, posmične sile i temperature u zoni rezanja

| Oznaka eksperimenta<br>prema redoslijedu<br>izvođenja | $X1$ | $X2$ | $v_c$<br>m/min | $f$<br>mm/o |
|---|------|------|----------------|-------------|
| 1   | 0    | 1    | 233            | 0,11        |
| 2   | 1    | -1   | 373            | 0,05        |
| 3   | 0    | 0    | 233            | 0,08        |
| 4   | 1    | 1    | 373            | 0,11        |
| 5   | 1    | 0    | 373            | 0,08        |
| 6   | 0    | -1   | 233            | 0,05        |
| 7   | -1   | 0    | 93             | 0,08        |
| 8   | 0    | 0    | 233            | 0,08        |
| 9   | 0    | 0    | 233            | 0,08        |
| 10  | -1   | 1    | 93             | 0,11        |
| 11  | -1   | -1   | 93             | 0,05        |
| 12  | 0    | 0    | 233            | 0,08        |
| 13  | 0    | 0    | 233            | 0,08        |

#### 5.4. Eksperimentalni rezultati

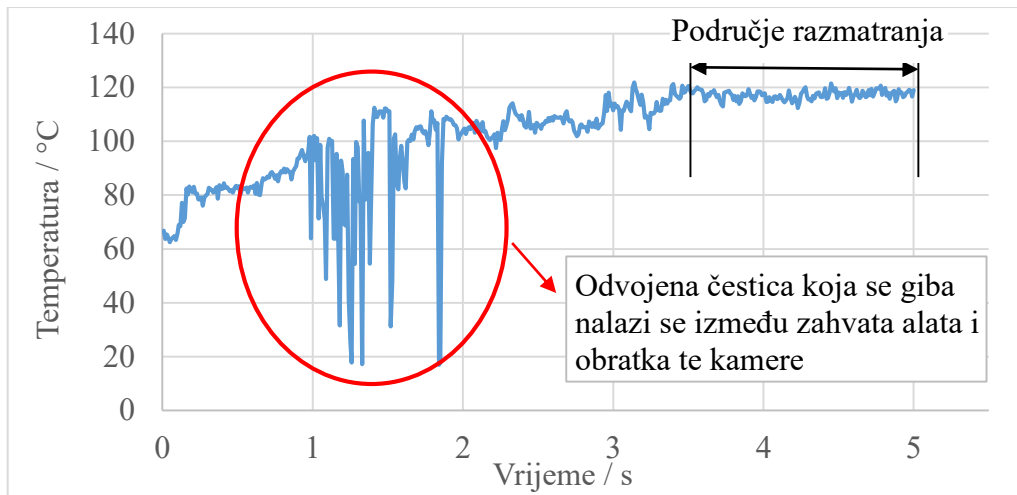
Eksperimentalni rezultati za plan eksperimenata, Tablica 5.5., predstavljeni su u Tablici 5.6. Sve izlazne veličine dobivene su izravnim mjerenjima koristeći mjernu opremu i postavke

mjerenja objašnjene u poglavlju 5.1. Kako bi se osigurala vjerodostojnost eksperimentalnih istraživanja, ostali parametri procesa su nepromjenjivi tijekom cijelog eksperimenta. Nepromjenjive značajke su: temperatura i vlažnost zraka, obradni sustav (stroj, alat, obradak, stezna naprava), materijal obratka, geometrija alata i dubina rezanja  $a_p = 3$  mm.

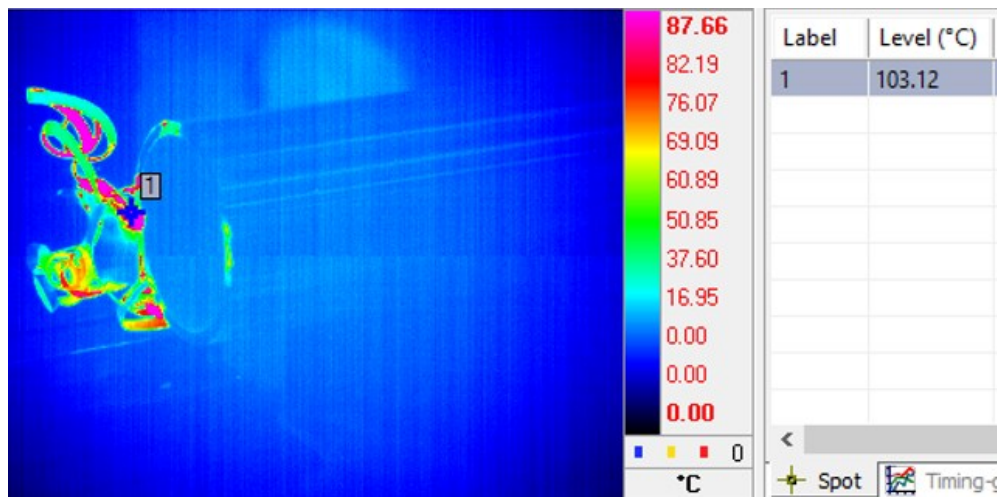
Tablica 5.6. Ulazne veličine i rezultati mjerenja

| Redni broj | $v_c$<br>m/min | $f$<br>mm/o | $F_c$<br>N/mm | $F_f$<br>N/mm | $T$<br>°C |
|------------|----------------|-------------|---------------|---------------|-----------|
| 1          | 233            | 0,11        | 88            | 41            | 169       |
| 2          | 373            | 0,05        | 49            | 28            | 192       |
| 3          | 233            | 0,08        | 68            | 36            | 162       |
| 4          | 373            | 0,11        | 81            | 33            | 200       |
| 5          | 373            | 0,08        | 65            | 31            | 190       |
| 6          | 233            | 0,05        | 55            | 31            | 160       |
| 7          | 93             | 0,08        | 83            | 47            | 119       |
| 8          | 233            | 0,08        | 71            | 35            | 162       |
| 9          | 233            | 0,08        | 70            | 36            | 162       |
| 10         | 93             | 0,11        | 113           | 59            | 120       |
| 11         | 93             | 0,05        | 67            | 41            | 117       |
| 12         | 233            | 0,08        | 73            | 37            | 162       |
| 13         | 233            | 0,08        | 71            | 38            | 162       |

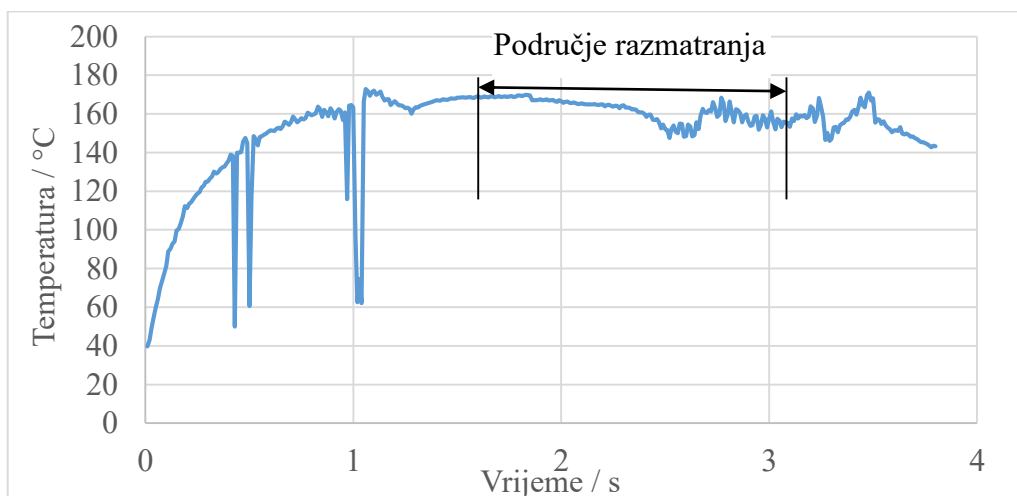
Na Slici 5.11., Slici 5.13. te Slici 5.15. prikazani su primjeri karakterističnih snimaka raspodjele temperature. Na slikama je ucrtana točka jedan, s ciljem označavanja mjesta očitavanja temperature. Ta točka je pokretna budući da se alat i zona rezanja gibaju. Tako su omogućeni rezultati temperature rezanja u ovisnosti o vremenu, Slika 5.10., Slika 5.12. i Slika 5.14. Važno je napomenuti da su dolovi na pojedinim dijagramima posljedica spajanja više različitih dijagrama. Spajanje više različitih dijagrama je nužno zbog već objašnjenog gibanja alata. Na početku rezanja nastala količina topline se povećava do maksimalne vrijednosti, a istovremeno se toplina počinje odvoditi odvojenom česticom, obratkom, alatom i okolinom. Nakon određenog vremena nastupa ravnotežno stanje između nastale i odvedene količine topline. Temperatura u zoni rezanja je određena kao aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti u određenom području razmatranja (kada je nastupilo ravnotežno stanje). Za izračun aritmetičke sredine korišteno je najmanje 140 izmjerenih vrijednosti.



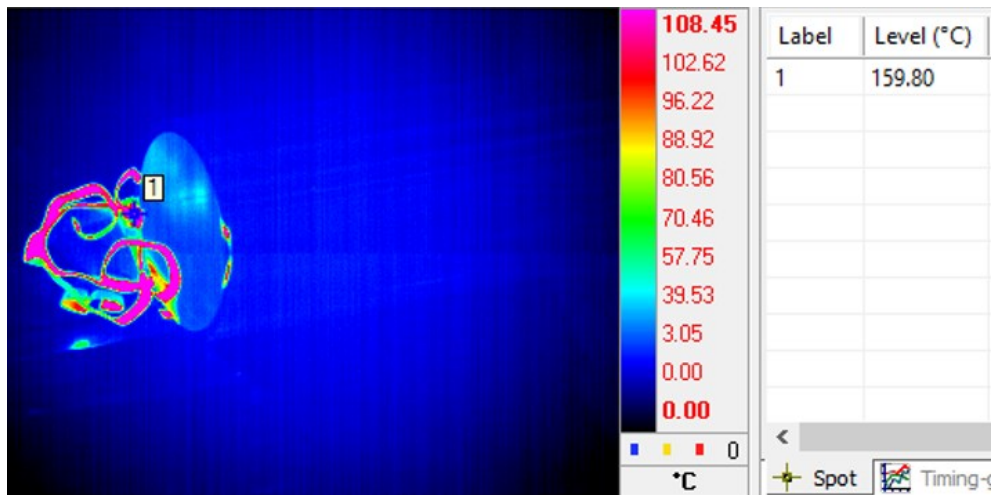
Slika 5.10. Izmjerena temperatura u zoni rezanja za  $v_c = 93 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,05 \text{ mm/o}$



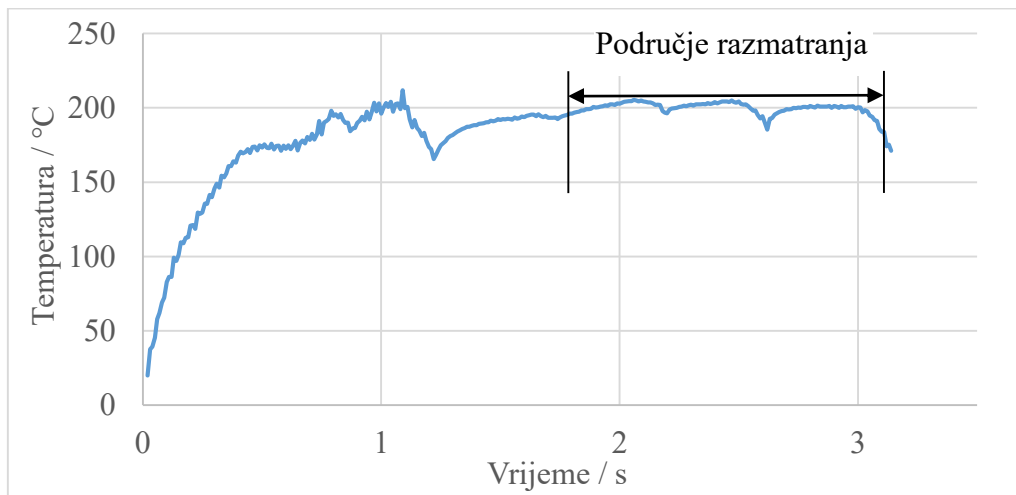
Slika 5.11. Primjer snimka raspodjele temperature za  $v_c = 93 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,05 \text{ mm/o}$



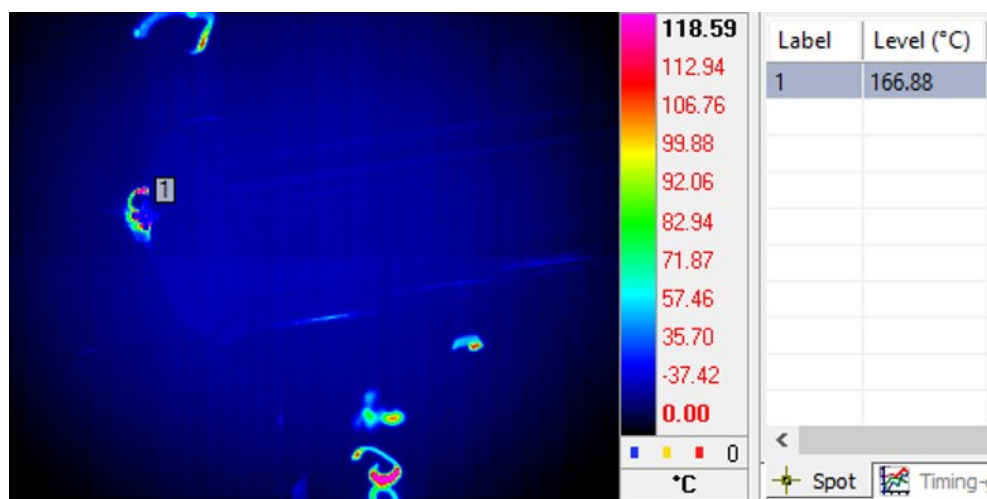
Slika 5.12. Izmjerena temperatura u zoni rezanja za  $v_c = 233 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm/o}$



Slika 5.13. Primjer snimka raspodjele temperature za  $v_c = 233 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm/o}$



Slika 5.14. Izmjerena temperatura u zoni rezanja za  $v_c = 373 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,11 \text{ mm/o}$



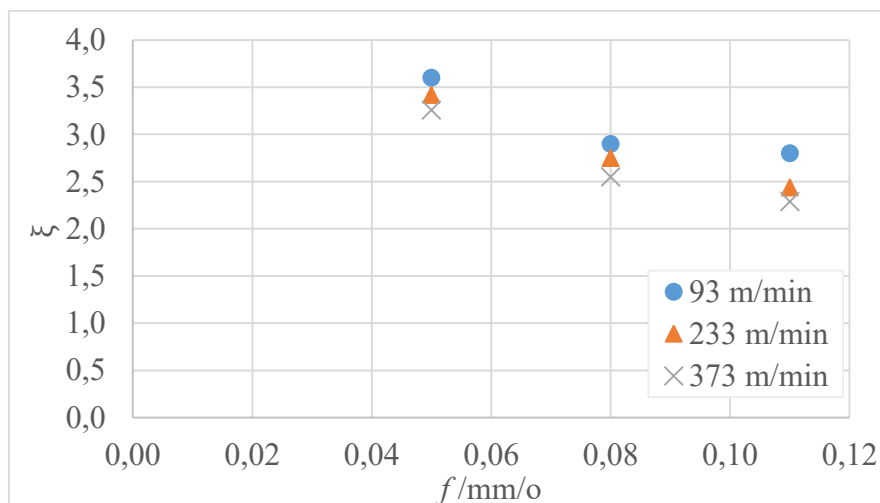
Slika 5.15. Primjer snimka raspodjele temperature za  $v_c = 373 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,11 \text{ mm/o}$

Debljina odvojene čestice ( $h_1$ ) za određeni eksperiment je srednja vrijednost 15 mjerenja na različitim mjestima, Tablica 5.7. Primjenom jednadžbe (2.2.) određene su vrijednosti koeficijenta sabijanja za različite parametre obrade.

Tablica 5.7. Parametri obrade i rezultati mjerenja debljine odvojene čestice

| $v_c$<br>m/min | $f$<br>mm/o | $h_1$<br>mm | $\xi$ |
|----------------|-------------|-------------|-------|
| 93             | 0,05        | 0,180       | 3,60  |
| 233            | 0,05        | 0,171       | 3,42  |
| 373            | 0,05        | 0,163       | 3,26  |
| 93             | 0,08        | 0,232       | 2,90  |
| 233            | 0,08        | 0,220       | 2,75  |
| 373            | 0,08        | 0,204       | 2,55  |
| 93             | 0,11        | 0,308       | 2,80  |
| 233            | 0,11        | 0,268       | 2,44  |
| 373            | 0,11        | 0,252       | 2,29  |

Ovisnost koeficijenta sabijanja o posmaku za različite brzine rezanja je prikazana na Slici 5.16. Može se uočiti da koeficijent sabijanja opada i s porastom brzine rezanja i s porastom posmaka.



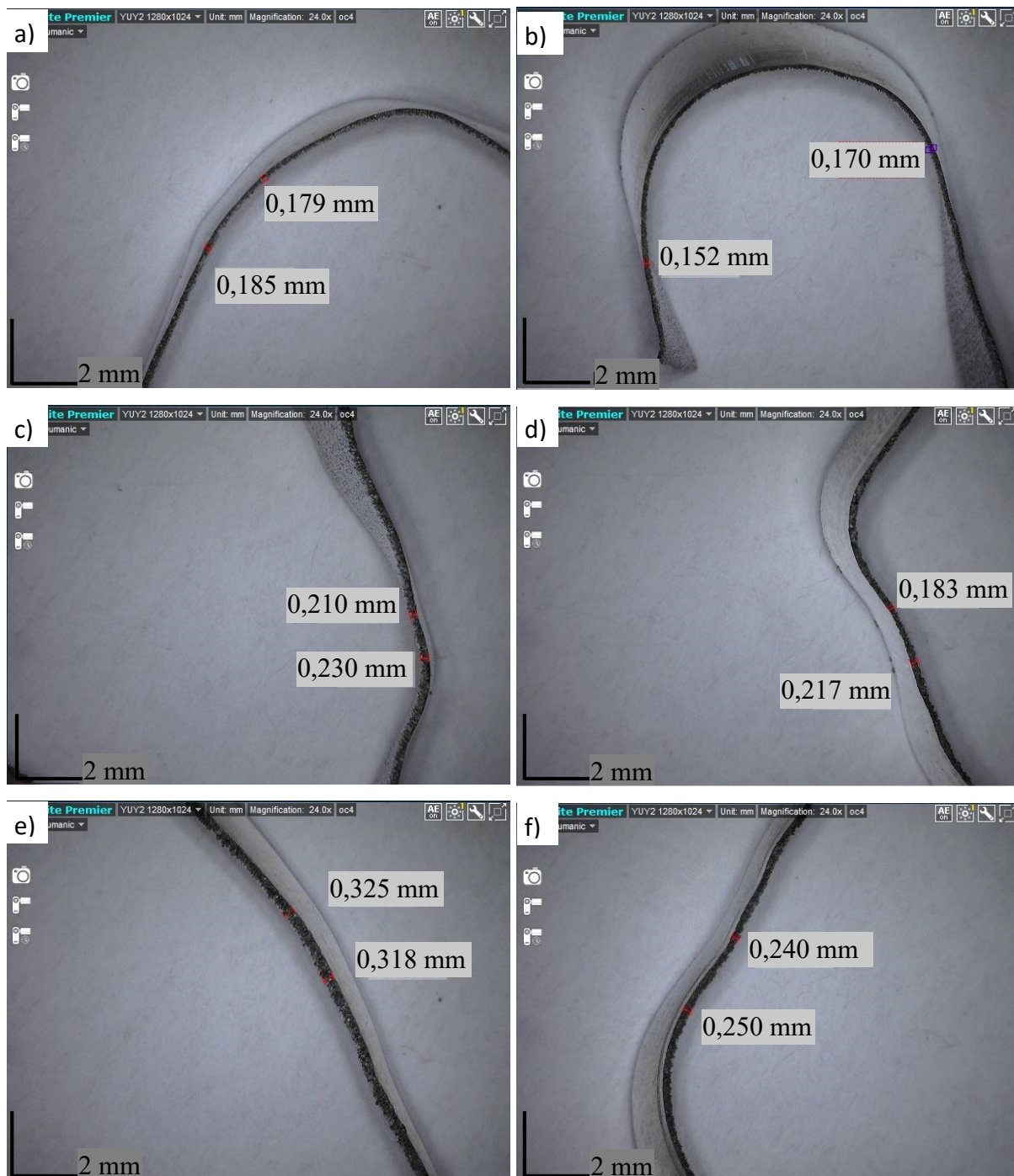
Slika 5.16. Utjecaj brzine rezanja i posmaka na koeficijent sabijanja

Primjeri mjerenja debljina odvojene čestice su prikazani na Slici 5.17.

Pouzdana matematički modeli mogu se koristiti u određivanju viševarijantnih rješenja iz kojeg je moguće odrediti uvjete optimalno vođenog procesa, geometriju alata, vrijeme obrade i sl. Tako je moguće povećati iskoristivost obradnog sustava, poboljšati kvalitetu proizvoda, smanjiti troškove postupka te u konačnici povećati ekonomsku učinkovitost. U ovom poglavlju



su predstavljeni rezultati eksperimentalnog istraživanja. U sljedećem poglavlju su statističkom obradom eksperimentalnih podataka određeni matematički modeli koji opisuju ovisnost komponenti sile rezanja te temperature u zoni rezanja o parametrima obrade.



Slika 5.17. Primjeri mjerenja debljine odvojene čestice za različite parametre obrade:

- a)  $v_c = 93 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,05 \text{ mm/o}$ , b)  $v_c = 373 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,05 \text{ mm/o}$ ,  
 c)  $v_c = 93 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm/o}$ , d)  $v_c = 373 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm/o}$ ,  
 e)  $v_c = 93 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,11 \text{ mm/o}$ , f)  $v_c = 373 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,11 \text{ mm/o}$

## 6. STATISTIČKA OBRADA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA I OPTIMIZACIJA ULAZNIH PARAMETARA ORTOGONALNOG REZANJA

Metoda modeliranja je sistematski istraživački postupak pomoću kojeg se izrađuje fizikalni, matematički, računalni ili drugi model kako bi se zamijenio stvarni objekt. Postupak analize i ispitivanja je brži i jeftiniji nego na stvarnom objektu. Osnovni je cilj modeliranja da se što točnije i što potpunije spoznaju sustavi ili procesi. Matematičkim modeliranjem se na egzaktan način prikazuju i objašnjavaju zakonitosti. Matematički modeli dobiveni modeliranjem služe za predviđanje parametara procesa, optimizaciju, simulaciju te upravljanje procesima i sustavima. Postoje različite metode za dobivanje matematičkih modela, a jedna od njih je regresijska analiza kojom se određuju funkcijske veze između zavisno promjenjive veličine i nezavisno promjenjivih veličina.

Obzirom da je u procesu obrade prisutno više utjecajnih faktora i njihovih interakcija, teško je teorijski pomoću analitičkih modela pouzdano predvidjeti izlazne parametre procesa. Budući da se u većini realnih procesa ili sustava izlazne veličine modela mijenjaju iako su ulazne veličine nepromjenjive, često se primjenjuje stohastičko modeliranje utemeljeno na korištenju statističkih modela i eksperimentalnih rezultata. Stohastičke modele karakteriziraju slučajne varijable koje su predstavljene distribucijama vjerojatnosti [146], [147].

Cilj modeliranja u ovom radu je određivanje utjecaja ulaznih veličina (parametri obrade) na izlazne veličine (komponente sile rezanja, temperatura u zoni rezanja) i izrada matematičkog modela u svrhu optimizacije ortogonalnog rezanja.

### 6.1. Metodologija izrade i vrednovanja matematičkih modela

Pomoću programskog paketa Design Expert 7.0 su statistički obrađeni rezultati mjerenja komponenti sile ortogonalnog rezanja i temperature u zoni rezanja. Izrađeni su matematički modeli koji opisuju utjecaj parametara obrade na komponente sile rezanja i temperaturu u zoni rezanja pomoću navedenog softvera. Prikladnost modela je ispitana pomoću F-testa odnosno određivanjem značajnosti izrađenih modela i pojedinih članova te određivanjem odstupanja od modela. Navedena  $F$ -vrijednost modela predstavlja omjer procijenjene varijance modela i

procijenjene varijance ostatka. Veliki broj  $F$ -vrijednosti ukazuje da je varijanca u velikoj mjeri objašnjena modelom, a mali broj da su odstupanja nastala uslijed šumova. Vrijednost „ $Prob > F$ “ manja od 0,05 za model, odstupanje od modela te pojedine članove modela govori o značajnosti njihovog utjecaja. Ako su neki članovi neznačajni („ $Prob > F$ “ veća od 0,05) može se provesti redukcija modela isključivanjem neznačajnih članova. Koeficijent determinacije  $R^2$  predstavlja proporciju protumačenih odstupanja u ukupnoj sumi kvadrata odstupanja te poprima vrijednost između nula i jedan. Što je koeficijent determinacije bliži vrijednosti jedan, promatrani se model smatra reprezentativnijim jer se više varijabiliteta pripisuje djelovanju ulaznih veličina. Prilagođeni  $R^2$  ( $R_{adj}^2$ ) predstavlja  $R^2$  prilagođen broju stupnjeva slobode modela u odnosu na broj stanja eksperimenata te se model smatra značajnim ako je njegova vrijednost veća od 0,75 [148]. Predviđeni  $R^2$  ( $R_{pred}^2$ ) je mjera iznosa varijacija u novim podacima objašnjenim pomoću modela. Razlika između  $R_{adj}^2$  i  $R_{pred}^2$  ne smije biti veća od 0,2 [146]. Posljednja veličina korištena za analizu i vrednovanje kvalitete dobivenih matematičkih modela je adekvatna preciznost. To je mjera raspona predviđenog odziva u odnosu na njegovu grešku. Drugim riječima, to je omjer signal – šum te je poželjno da taj omjer bude veći od četiri.

Rezultat provedbe statističke obrade eksperimentalnih rezultata je dobivanje polinomnih matematičkih modela. Polinomi trećeg reda i viših redova se rijetko koriste u praksi. Polinomni matematički model drugog reda ima oblik:

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 \quad (6.1.)$$

Na ovaj način se polinomom aproksimira određeni problem te se rješavanje svodi na izračunavanje koeficijenata modela  $b_0$ ,  $b_j$ ,  $b_{ij}$  i  $b_{jj}$ .

## 6.2. Statistička obrada eksperimentalnih rezultata

U nastavku su prezentirani rezultati statističke obrade eksperimentalnih podataka za ortogonalno rezanje. Korišten je softver Design Expert 7.0 te je polazni matematički model polinom drugog reda, izraz 6.1.

### 6.2.1. Matematički modeli komponenti sile ortogonalnog rezanja

Nakon odabira oblika modela provedena je analiza varijance (ANOVA) formiranih modela. U Tablici 6.1. je predstavljena analiza varijance za komponentu sile ortogonalnog rezanja  $F_c$ .  $F$ -vrijednost modela iznosi 100,64 i ukazuje na značajnost modela. Vjerojatnost pojave tako velike  $F$ -vrijednosti uslijed šuma iznosi 0,01 %. Kako bi u model bili uključeni samo značajni članovi, provedena je spomenuta redukcija modela. „ $Prob>F$ “ vrijednost za model i sve članove je manja od 0,05 što ukazuje na značajnost modela i svih članova. „ $Prob>F$ “ vrijednost za odstupanje od modela je 0,1277 što ukazuje da ova vrijednost nije značajna. Obzirom da odstupanje od modela nije značajno, model je prihvaćen i pogodan za provođenje daljnje analize.

Tablica 6.1. Analiza varijance za glavnu silu rezanja  $F_c$

|                      | Br. stupnjeva slobode | Suma kvadrata odstupanja | Srednji kvadrat odstupanja | $F$ -vrijednost | $Prob>F$ |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------|----------|
| Model                | 4                     | 2970,05                  | 742,51                     | 100,64          | <0,0001  |
| $v_c$                | 1                     | 770,67                   | 770,67                     | 104,46          | <0,0001  |
| $f$                  | 1                     | 2053,50                  | 2053,50                    | 278,33          | <0,0001  |
| $v_{cf}$             | 1                     | 49,00                    | 49,00                      | 6,64            | 0,0328   |
| $v_c^2$              | 1                     | 96,89                    | 96,89                      | 13,13           | 0,0067   |
| Ostatak              | 8                     | 59,02                    | 7,38                       |                 |          |
| Odstupanje od modela | 4                     | 45,82                    | 11,46                      | 3,47            | 0,1277   |
| Čista pogreška       | 4                     | 13,20                    | 3,30                       |                 |          |
| Ukupno               | 12                    | 3029,08                  |                            |                 |          |

U Tablici 6.2. su prikazani rezultati regresijske analize za komponentu sile ortogonalnog rezanja  $F_c$ . Koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9805$  pokazuje da je model reprezentativan. Razlika između  $R_{adj}^2$  i  $R_{pred}^2$  je manja od 0,2, a adekvatna preciznost je veća od traženog minimuma koji iznosi četiri.

Tablica 6.2. Rezultati regresijske analize za glavnu silu rezanja  $F_c$

|                      |         |
|----------------------|---------|
| $R^2$                | 0,9805  |
| $R_{adj}^2$          | 0,9708  |
| $R_{pred}^2$         | 0,8930  |
| Adekvatna preciznost | 35,4201 |

Matematički model za izračunavanje komponente sile ortogonalnog rezanja  $F_c$  ima oblik:

$$F_c = 40,02059 - 0,14448v_c + 810,83333f - 0,83333v_c f + 0,00028v_c^2 \quad (6.2.)$$

U Tablici 6.3. je predstavljena analiza varijance za komponentu sile ortogonalnog rezanja  $F_f$ .  $F$ -vrijednost modela iznosi 159,40 i ukazuje na značajnost modela. Vjerojatnost pojave tako velike  $F$ -vrijednosti uslijed šuma iznosi 0,01 %. Kako bi u model bili uključeni samo značajni članovi, provedena je spomenuta redukcija modela. „ $Prob>F$ “ vrijednost za model i sve članove je manja od 0,05 što ukazuje na značajnost modela i svih članova. „ $Prob>F$ “ vrijednost za odstupanje od modela je 0,1992 što ukazuje da ova vrijednost nije značajna. Obzirom da odstupanje od modela nije značajno, model je prihvaćen i pogodan za provođenje daljnje analize.

Tablica 6.3. Analiza varijance za posmičnu silu  $F_f$

|                      | Br. stupnjeva slobode | Suma kvadrata odstupanja | Srednji kvadrat odstupanja | $F$ -vrijednost | $Prob>F$ |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------|----------|
| Model                | 4                     | 779,00                   | 194,75                     | 159,40          | <0,0001  |
| $v_c$                | 1                     | 504,17                   | 504,17                     | 412,67          | <0,0001  |
| $f$                  | 1                     | 181,50                   | 181,50                     | 148,56          | <0,0001  |
| $v_c f$              | 1                     | 42,25                    | 42,25                      | 34,58           | 0,0004   |
| $v_c^2$              | 1                     | 51,08                    | 51,08                      | 41,81           | 0,0002   |
| Ostatak              | 8                     | 9,77                     | 1,22                       |                 |          |
| Odstupanje od modela | 4                     | 6,97                     | 1,74                       | 2,49            | 0,1992   |
| Čista pogreška       | 4                     | 2,80                     | 0,70                       |                 |          |
| Ukupno               | 12                    | 788,77                   |                            |                 |          |

Matematički model za izračunavanje komponente sile ortogonalnog rezanja  $F_f$  ima oblik:

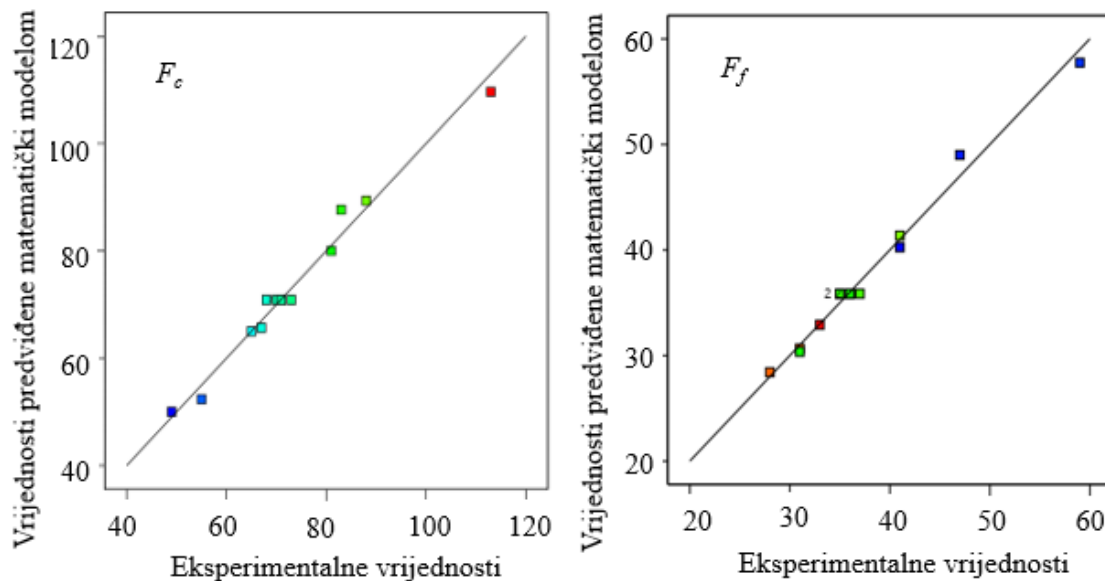
$$F_f = 33,03606 - 0,09811v_c + 363,63095f - 0,77381v_c f + 0,00020v_c^2 \quad (6.3.)$$

U Tablici 6.4. prikazani su rezultati regresijske analize za komponentu sile ortogonalnog rezanja  $F_f$ . Koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9876$  pokazuje da je model reprezentativan. Razlika između  $R_{adj}^2$  i  $R_{pred}^2$  je manja od 0,2, a adekvatna preciznost je veća od traženog minimuma koji iznosi četiri.

Tablica 6.4. Rezultati regresijske analize za posmičnu silu  $F_f$

|                      |         |
|----------------------|---------|
| $R^2$                | 0,9876  |
| $R^2_{adj}$          | 0,9814  |
| $R^2_{pred}$         | 0,9352  |
| Adekvatna preciznost | 42,7919 |

Usporedba eksperimentalnih rezultata sila ortogonalnog rezanja te rezultata dobivenih primjenom matematičkih modela je prikazana na Slici 6.1.



Slika 6.1. Usporedba predviđanja komponenti sile ortogonalnog rezanja primjenom matematičkih modela i eksperimentalnih vrijednosti

### 6.2.2. Matematički model temperature u zoni rezanja

U Tablici 6.5. je predstavljena analiza varijance za temperaturu u zoni rezanja  $T$ .  $F$ -vrijednost modela iznosi 621,09 i ukazuje na značajnost modela. Vjerojatnost pojave tako velike  $F$ -vrijednosti uslijed šuma iznosi 0,01 %. Kako bi u model bili uključeni samo značajni članovi, provedena je spomenuta redukcija modela. „ $Prob>F$ “ vrijednost za model i sve članove je manja od 0,05 što ukazuje na značajnost modela i svih članova. „ $Prob>F$ “ vrijednost za odstupanje od modela je 0,2363 što ukazuje da ova vrijednost nije značajna. Obzirom da odstupanje od modela nije značajno, model je prihvaćen i pogodan za provođenje daljnje analize.

Tablica 6.5. Analiza varijance za temperaturu u zoni rezanja

|                      | Br. stupnjeva slobode | Suma kvadrata odstupanja | Srednji kvadrat odstupanja | F-vrijednost | Prob>F  |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|--------------|---------|
| Model                | 4                     | 8652,45                  | 2163,11                    | 621,09       | <0,0001 |
| $v_c$                | 1                     | 8437,50                  | 8437,50                    | 2422,65      | <0,0001 |
| $f$                  | 1                     | 73,50                    | 73,50                      | 21,10        | 0,0018  |
| $v_c^2$              | 1                     | 141,40                   | 141,40                     | 40,60        | 0,0002  |
| $f^2$                | 1                     | 22,35                    | 22,35                      | 6,42         | 0,0351  |
| Ostatak              | 8                     | 27,86                    | 3,48                       |              |         |
| Odstupanje od modela | 4                     | 19,06                    | 4,77                       | 2,17         | 0,2363  |
| Čista pogreška       | 4                     | 8,80                     | 2,20                       |              |         |
| Ukupno               | 12                    | 8680,31                  |                            |              |         |

U Tablici 6.6. su prikazani rezultati regresijske analize za temperaturu u zoni rezanja. Koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9805$  pokazuje da je model reprezentativan. Razlika između  $R_{adj}^2$  i  $R_{pred}^2$  je manja od 0,01, a adekvatna preciznost je 70,8498.

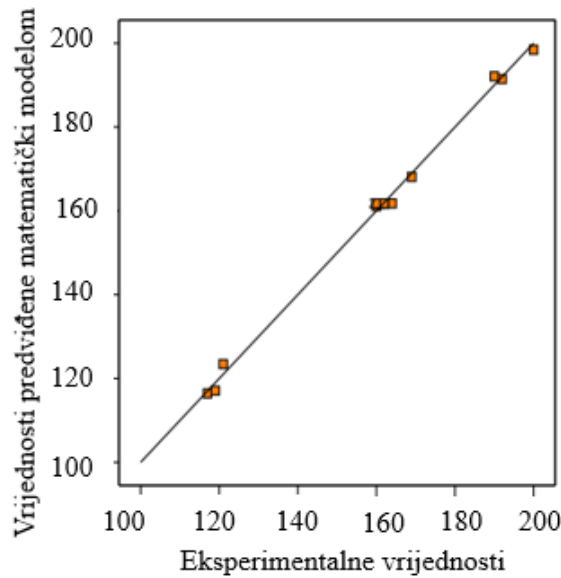
Tablica 6.6. Rezultati regresijske analize za temperaturu u zoni rezanja

|                      |         |
|----------------------|---------|
| $R^2$                | 0,9968  |
| $R_{adj}^2$          | 0,9952  |
| $R_{pred}^2$         | 0,9891  |
| Adekvatna preciznost | 70,8498 |

Matematički model za izračunavanje temperature u zoni rezanja ima oblik:

$$T = 90,42573 + 0,43797v_c - 389,08046f - 0,00036v_c^2 + 3160,91954f^2 \quad (6.4.)$$

Usporedba eksperimentalnih rezultata te rezultata dobivenih primjenom matematičkih modela je prikazana na Slici 6.2. Može se uočiti visok stupanj adekvatnosti i pouzdanosti predloženog pristupa unutar postavljenih granica ulaznih veličina.

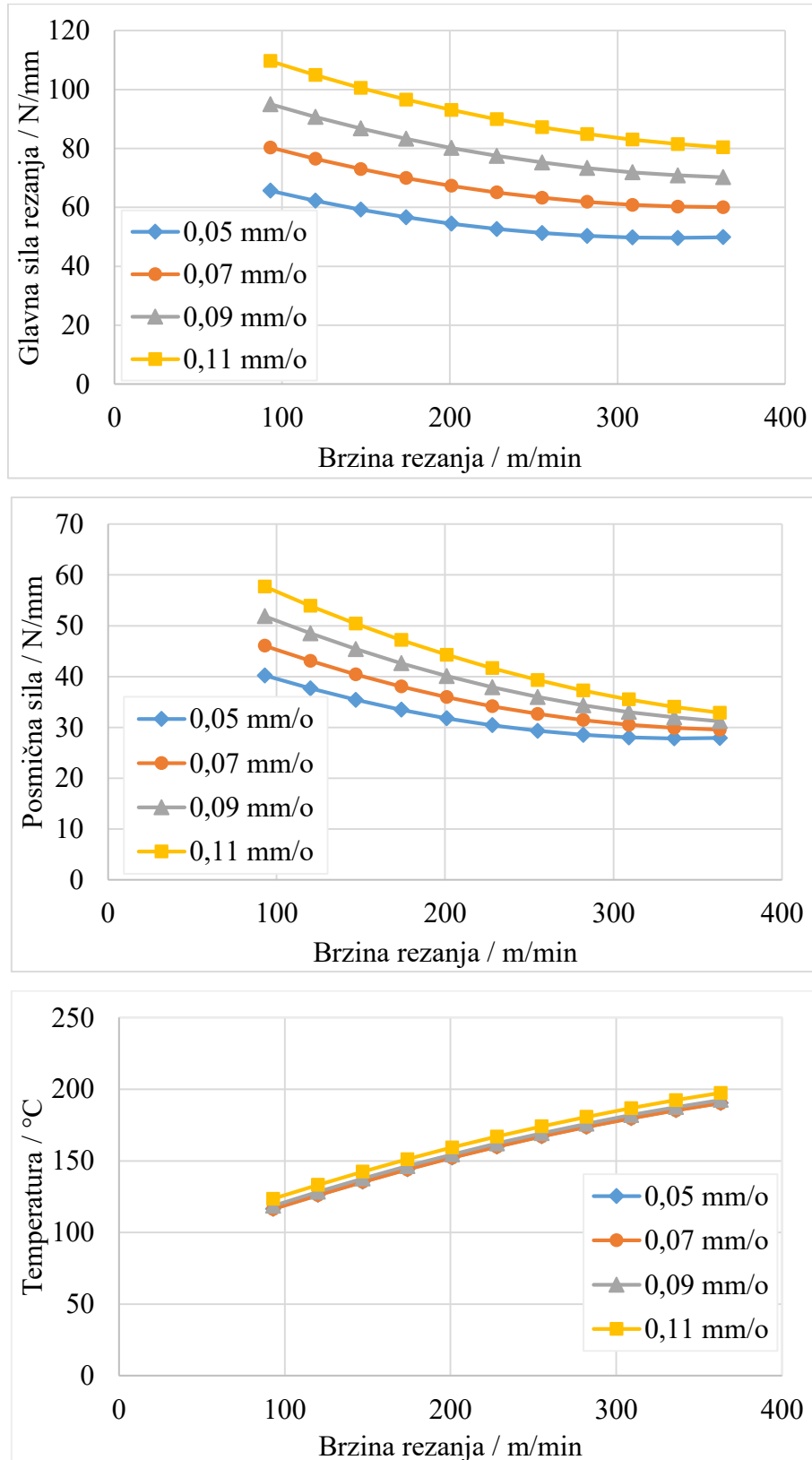


Slika 6.2. Usporedba predviđanja temperature u zoni rezanja primjenom matematičkog modela i eksperimentalnih vrijednosti

### 6.3. Analiza utjecaja brzine rezanja i posmaka na komponente sile ortogonalnog rezanja i temperaturu u zoni rezanja

Nakon prikupljanja i obrade eksperimentalnih rezultata te definicije, odabira modela i regresijske analize slijedi analiza utjecaja ulaznih veličina na izlazne veličine. Pregledom rezultata analize varijance dobivenih matematičkih modela za ortogonalno rezanje može se utvrditi kako isti modeli adekvatno i reprezentativno opisuju ispitivani proces. Matematički modeli komponenti sile ortogonalnog rezanja i temperature u zoni rezanja poslužili su za konstruiranje dijagrama koji opisuju utjecaj ulaznih veličina na promatrane izlazne veličine. Na Slici 6.3. prikazan je utjecaj brzine rezanja i posmaka na glavnu silu rezanja  $F_c$ , posmičnu silu  $F_f$  i temperaturu u zoni rezanja  $T$ .





Slika 6.3. Utjecaj brzine rezanja i posmaka na izlazne veličine procesa

Komponente sile ortogonalnog rezanja se smanjuju povećanjem brzine rezanja. Povećanjem brzine rezanja raste kut nagiba ravnine smicanja odvojenog sloja materijala, a smanjuje se duljina ravnine smicanja pa je sila potrebna za deformaciju materijala manja. Također, veća brzina rezanja pri istom posmaku pretpostavlja odvajanje manje količine materijala obratka za jedan okretaj obratka što se odražava kroz manju vrijednost sile. Povećavanjem posmaka povećavaju se obje komponente sile ortogonalnog rezanja. Uzrok tome je povećanje poprečnog presjeka odvojenog sloja materijala za što je potrebna veća energija. Također, povećanjem parametara obrade više se mehaničke energije pretvara u toplinu što uzrokuje porast temperature u zoni rezanja. Utjecaj posmaka na vrijednosti temperature u zoni rezanja je u usporedbi s utjecajem brzine rezanja znatno manji.

Ispitivanja su potvrdila očekivani utjecaj brzine rezanja i posmaka na komponente sile ortogonalnog rezanja i temperaturu u zoni rezanja. S povećanjem posmaka povećavaju se komponente sile rezanja dok se povećavanjem brzine rezanja komponente sile rezanja smanjuju. Povećanjem brzine rezanja i posmaka se povećava i temperatura u zoni rezanja.

Nakon provedene statističke obrade eksperimentalnih podataka sljedeći korak je određivanje optimalnih parametara obrade s ciljem poboljšanja tehnološke i ekonomske učinkovitosti procesa obrade. U sljedećem poglavlju je opisana višeciljna optimizacija ortogonalnog rezanja uporabom genetskog algoritma.

#### **6.4. Optimizacija ortogonalnog rezanja genetskim algoritmom**

U ovom radu cilj optimizacije promatranog postupka je određivanje optimalnih parametara obrade kako bi se postigle minimalne vrijednosti komponenti sile rezanja uz minimalnu temperaturu u zoni rezanja. Za rješavanje višeciljne optimizacije primijenjena je metoda težinskih koeficijenata. Vrijednost težinskog koeficijenta određuje prioritet funkcije.

Vrijednosti parametara obrade su ograničene sukladno planu eksperimenata (poglavlje 5). Izvedena je višeciljna optimizacija na temelju matematičkih modela dobivenih u poglavlju 6.1. i poglavlju 6.2. Funkcije cilja su: minimalna glavna sila rezanja, minimalna posmična sila i minimalna temperatura u zoni rezanja. Minimalne vrijednosti promatranih izlaznih veličina su važne jer velike sile uzrokuju ubrzano trošenje alata, povećani utrošak snage, a pri povišenim vrijednostima temperature u zoni rezanja intenziviraju se svi oblici trošenja. Primjenom

težinskih faktora, pridijeljena je jednaka važnost svim elementima funkcije cilja te se problem optimizacije formulira na sljedeći način:

$$\text{Minimizirati: } f(x) = w_1 \frac{F_c}{F_c^*} + w_2 \frac{F_f}{F_f^*} + w_3 \frac{T}{T^*} \quad (6.5.)$$

gdje je:

$w_1, w_2, w_3$  – težinski faktori,  $w_1 + w_2 + w_3 = 1$

$F_c^*$  - ciljna vrijednost, glavna sila rezanja

$F_f^*$  - ciljna vrijednost, posmična sila

$T^*$  - ciljna vrijednost, temperatura u zoni rezanja.

Težinski faktor, ciljne vrijednosti te ograničenja su navedeni u Tablici 6.7.

Tablica 6.7. Vrijednosti parametara korištenih u optimizaciji

|                 |             |
|-----------------|-------------|
| $w_1, w_2, w_3$ | 0,333       |
| $f$ / mm/o      | 0,05 - 0,11 |
| $v_c$ / m/min   | 93 - 373    |
| $F_c^*$ / N/mm  | 49          |
| $F_f^*$ / N/mm  | 28          |
| $T^*$ / °C      | 117         |

Parametri genetskog algoritma su: veličina populacije - 200, broj generacija - 200, vjerojatnost križanja – 0,75. Pripadni kodovi izrađeni su u programskom paketu MATLAB. Optimalne vrijednosti parametara obrade i izlazne veličine postupka za optimalne parametre dane su u Tablici 6.8.

Tablica 6.8. Predviđene vrijednosti izlaznih veličina za optimalne vrijednosti ulaznih veličina

|               |      |
|---------------|------|
| $f$ / mm/o    | 0,05 |
| $v_c$ / m/min | 233  |
| $F_c$ / N/mm  | 52   |
| $F_f$ / N/mm  | 30   |
| $T$ / °C      | 161  |

Nakon što su definirane optimalne vrijednosti ulaznih veličina, sljedeći korak je ispitivanje valjanosti modela odnosno odabranih optimalnih parametara (validacija). Validacija je proces uspoređivanja eksperimentalnih rezultata s rezultatima matematičkih modela unutar granica zadanih eksperimenata. Obzirom da su eksperimenti s optimalnim ulaznim parametrima već

napravljeni, nije potrebno napraviti dodatne eksperimente. Odstupanje eksperimentalnih rezultata od rezultata dobivenih primjenom matematičkih modela i genetskog algoritma nalaze se u granicama od 0,63 % do 5,45 % To upućuje na valjanost matematičkih modela i na to da rezultati dobiveni genetskim algoritmima predstavljaju globalni minimum funkcija cilja ili su jako bliski globalnom minimumu.

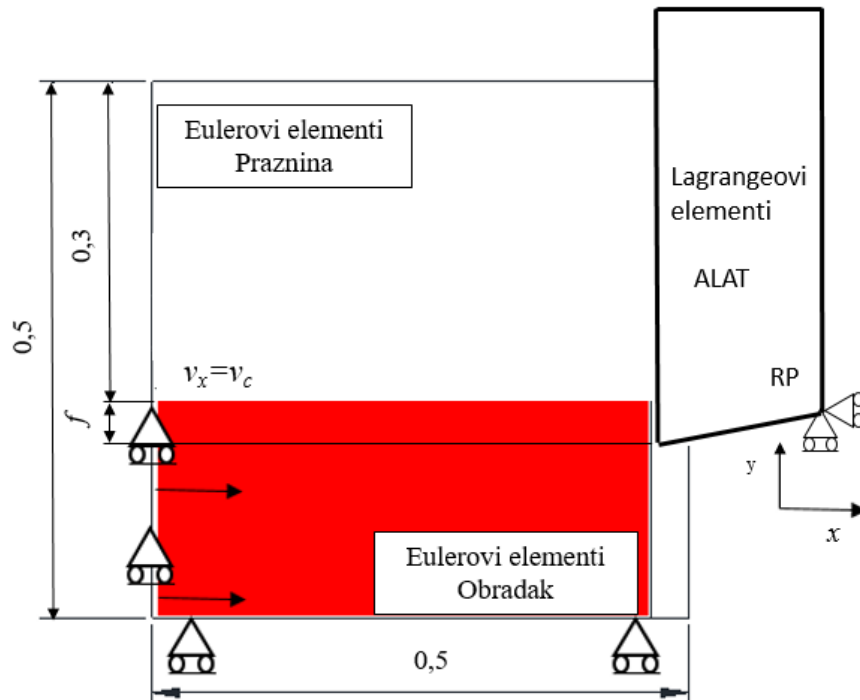
Nakon što su prikupljeni svi eksperimentalni podaci, u narednom poglavlju je predstavljen numerički model ortogonalnog rezanja.

## 7. NUMERIČKO MODELIRANJE ORTOGONALNOG REZANJA

U novije vrijeme postavlja se zahtjev za što pouzdanijim predviđanjem procesa odvajanja čestica. Pouzdanost numeričkih modela spomenutog procesa ovisi o brojnim postavkama i ulaznim parametrima (opis materijala obratka i alata, rubni uvjeti, model trenja, vremenska integracija, formulacija nelinearnog toplinsko-mehaničkog procesa u uvjetima velikih pomaka i deformacija, diskretizacija volumena alata i obratka). Iako su postupci obrade odvajanjem čestica najčešće trodimenzijski i geometrijski složeni, jednostavniji se slučaj ortogonalnog rezanja primjenjuje za objašnjavanje mehanike odvajanja materijala s obratka. Mehanika složenijih operacija trodimenzijskog, tzv. kosog rezanja se onda potom modelira pomoću geometrijskih i kinematičkih transformacijskih modela primijenjenih na ortogonalno rezanje [2].

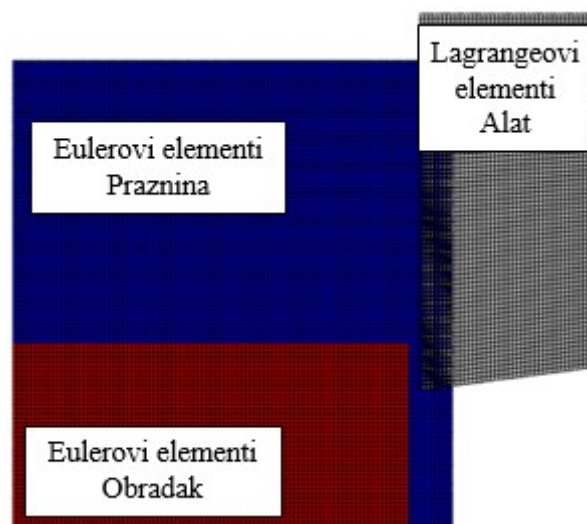
Provedena je numerička analiza ortogonalnog rezanja EN AW 6082 T6 legure u programskom paketu ABAQUS. Fleksibilnost ovog računalnog programa omogućuje istraživačima da se na temelju validacije modela uklone pogreške.

Model alata i obratka je izrađen primjenom programskog paketa ABAQUS/CAE. Simulacije su provedene u modulu ABAQUS/Explicit primjenjujući prethodno opisanu CEL formulaciju, Slika 7.1. U ovoj fazi istraživanja cilj je utvrditi odgovarajuće ulazne parametre te numeričke postavke. Mehaničke i toplinske karakteristike materijala obratka preuzete su iz literatura, Tablica 5.2. Kao i u eksperimentalnim ispitivanjima, prednji kut alata je  $0^\circ$  ( $\gamma = 0^\circ$ ), a stražnji kut alata je  $7^\circ$  ( $\alpha = 7^\circ$ ). Na Slici 7.1. oznaka RP predstavlja referentnu točku (engl. reference point) koja služi za prikupljanje informacija o veličinama sila rezanja. Alat je diskretiziran trodimenzijskim konačnim elementima C3D8RT (engl. 8-node thermally coupled brick, trilinear displacement and temperature, reduced integration, hourglass control). Prosječna veličina elemenata kojim se diskretizira volumen alata je  $5 \mu\text{m}$  u smjeru  $x$  osi i smjeru  $y$  osi. Obzirom da nije potrebno računati pomake u alatu te da tvrdoća materijala rezne oštrice ima veću vrijednost od tvrdoće materijala obratka, alat je pretpostavljen kao kruto tijelo. Tako je smanjeno vrijeme potrebno za provedbu simulacije. Obradak je diskretiziran trodimenzijskim Eulerovim elementima EC3D8RT (engl. 8-node thermally coupled linear eulerian brick, reduced integration, hourglass control).



Slika 7.1. Shematski prikaz obratka i alata u  $xy$  ravnini za primjer ortogonalnog rezanja

Početni izgled obratka je prikazan crvenom bojom na Slici 7.2. Plava boja prikazuje inicijalne praznine odnosno elemente kojima nije pridijeljen materijal. Visina praznog područja je odabrana kako bi se omogućilo u potpunosti formiranje odvojene čestice. Veličina Eulerovih elemenata je  $5 \mu\text{m}$  u smjeru osi  $x$  i smjeru osi  $y$  kako bi se izbjegao utjecaj orijentacije elementa.



Slika 7.2. Prikaz diskretizacije obratka i alata u  $xy$  ravnini

Eulerovi elementi moraju imati volumen zbog čega je širina alata i obratka (duljina elemenata smjeru  $z$  osi) također  $5 \mu\text{m}$  u ovoj fazi istraživanja. Kako bi se ostvarilo ravninsko stanje deformacije, pomaci u smjeru osi  $z$  su jednaki nuli tj. postavljena je ravnina simetrije okomita na  $z$  os. Debljina neodrezane odvojene čestice jednaka je posmaku  $f = 0,05 \text{ mm/o}$  te je brzina rezanja konstantna  $v_c = 186 \text{ m/min}$ . Za CEL formulaciju važno je postaviti dio Lagrangeovih elemenata na području gdje se nalaze Eulerovi elementi kojima nije pridijeljen materijal (praznina), Slika 7.2.

Sljedeći korak je odabir parametara Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja. Iz dostupne literature odabrana su tri skupa Johnson-Cookovih parametara za razmatranu leguru, Tablica 7.1. Može se uočiti da postoji razlika u vrijednostima svih parametara. Cilj je određivanje parametara Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja kojima će se ostvariti minimalno odstupanje predviđanja sila rezanja numeričkim simulacijama u odnosu na eksperimentalne podatke.

Tablica 7.1. Vrijednosti parametara Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja za leguru aluminija

EN AW 6082 T6

| literatura | $A$<br>MPa | $B$<br>MPa | $C$     | $n$   | $m$  | $\dot{\epsilon}_0$<br>$\text{s}^{-1}$ | $T_T$<br>$^{\circ}\text{C}$ | $T_0$<br>$^{\circ}\text{C}$ |
|------------|------------|------------|---------|-------|------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| [149]      | 250        | 243,6      | 0,00747 | 0,17  | 1,31 | 1                                     | 582                         | 25                          |
| [150]      | 277,33     | 307,93     | 0,0032  | 0,69  | 1,28 | 0,0001                                | 582                         | 25                          |
| [151]      | 201,55     | 250,87     | 0,00977 | 0,206 | 1,31 | 0,001                                 | 582                         | 25                          |

Nastajanje odvojene čestice također je jedan od problema u simulacijama obrade odvajanjem čestica pomoću metode konačnih elemenata. U ovoj fazi istraživanja je primijenjena konvencionalna metoda gdje je korišten Johnson-Cookov model inicijacije kao kriterij za modeliranje stvaranja inicijalnog oštećenja, izraz (3.62.) te model baziran na efektivnom razdvajanju za modeliranje razvoja oštećenja do krajnjeg loma, izraz (3.63.), Tablica 7.2.

Za modeliranje problema dodira primijenjen je osnovni kontakti algoritam (engl. general contact algorithm) koji automatski definira dodir na cijeli model te kaznena metoda. Definirane su prednja i stražnja površina alata kao glavne površine, a površina obratka kao sporedna površina. Primijenjen je Zorevljev model trenja gdje je koeficijent trenja izračunat na temelju eksperimentalnih rezultata za  $v_c = 186 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,05 \text{ mm/o}$ . Izračunata vrijednost koeficijenta trenja, izraz (3.59.), je prema uputama Ozela i Zerena [151] te Ducobua i suradnika [152] uvećana za 20 % i iznosi 0,7. Ova vrijednost je u skladu s eksperimentalnim ispitivanjima Zhanga i suradnici [154]. Nakon brojnih simulacija uočeno je da mala vrijednost smične

granice tečenja obratka dovodi do vrlo male posmične sile. S druge strane, visoka vrijednost smične granice tečenja obratka dovodi do naglog pada glavne sile rezanja bez njenog naknadnog povećanja, što nije slučaj kod ortogonalnog rezanja. Obzirom da u literaturi nije pronađena vrijednost za ekvivalentni plastični pomak pri potpunom lomu za razmatranu leguru, istražen je utjecaj i ovog parametra na sile ortogonalnog rezanja. Uočeno je da mala vrijednost ekvivalentnog plastičnog pomaka pri potpunom lomu dovodi do ranog loma u materijalu što rezultira manjim silama rezanja [155]. Velika vrijednost ekvivalentnog plastičnog pomaka pri potpunom lomu dovodi do kasnog loma u materijalu što dovodi do velikih sila rezanja. Metodom pokušaja i pogreške utvrdilo se da je optimalna vrijednost smične granice tečenja 290 MPa, vrijednost ekvivalentnog plastičnog pomaka pri potpunom lomu 0,057 mm. Vrijednost promatranog pomaka je u skladu s istraživanjima Lia i suradnici [156] za aluminijevu leguru EN AW 6061 T6.

Tablica 7.2. Vrijednost parametara koji opisuju inicijaciju i razvoj oštećenja u materijalu.

EN AW 6082 T6 [156], [157]

| $D_1$  | $D_2$ | $D_3$  | $D_4$ | $D_5$ | $\bar{u}_{p,D}$ /mm |
|--------|-------|--------|-------|-------|---------------------|
| 0,0164 | 2,245 | -2,798 | 0,007 | 3,65  | 0,057               |

Ostale značajke interakcije između obratka i alata su prikazane u Tablici 7.3., a definirane su na temelju pregleda literature predstavljenog u poglavlju 4. U obradi odvajanjem čestica utjecaj topline i mehanički utjecaj su međusobno povezani. Toplina nastaje zbog plastične deformacije i trenja te se prenosi kroz obradak, odvojenu česticu i alat te odlazi u okolinu. Porast temperature utječe na svojstva materijala odnosno na naprezanja u materijalu. Dakle, potrebno je provesti analizu prijenosa topline i mehaničku analizu istovremeno. To se može ostvariti potpuno spregnutom toplinsko-mehaničkom analizom gdje se jednadžbe nestacionarnog provođenja topline i jednadžbe gibanja rješavaju istovremeno.

Tablica 7.3. Značajke interakcije između obratka i alata

| $\mu$ | $\eta'$ | $q_{T1}$ | $\eta_p$ |
|-------|---------|----------|----------|
| 0,7   | 1       | 0,5      | 0,9      |

U programu ABAQUS, integracija jednadžbi nestacionarnog provođenja topline se može provesti korištenjem eksplicitne metode razlika unaprijed dok se brzine i ubrzanja čvorova



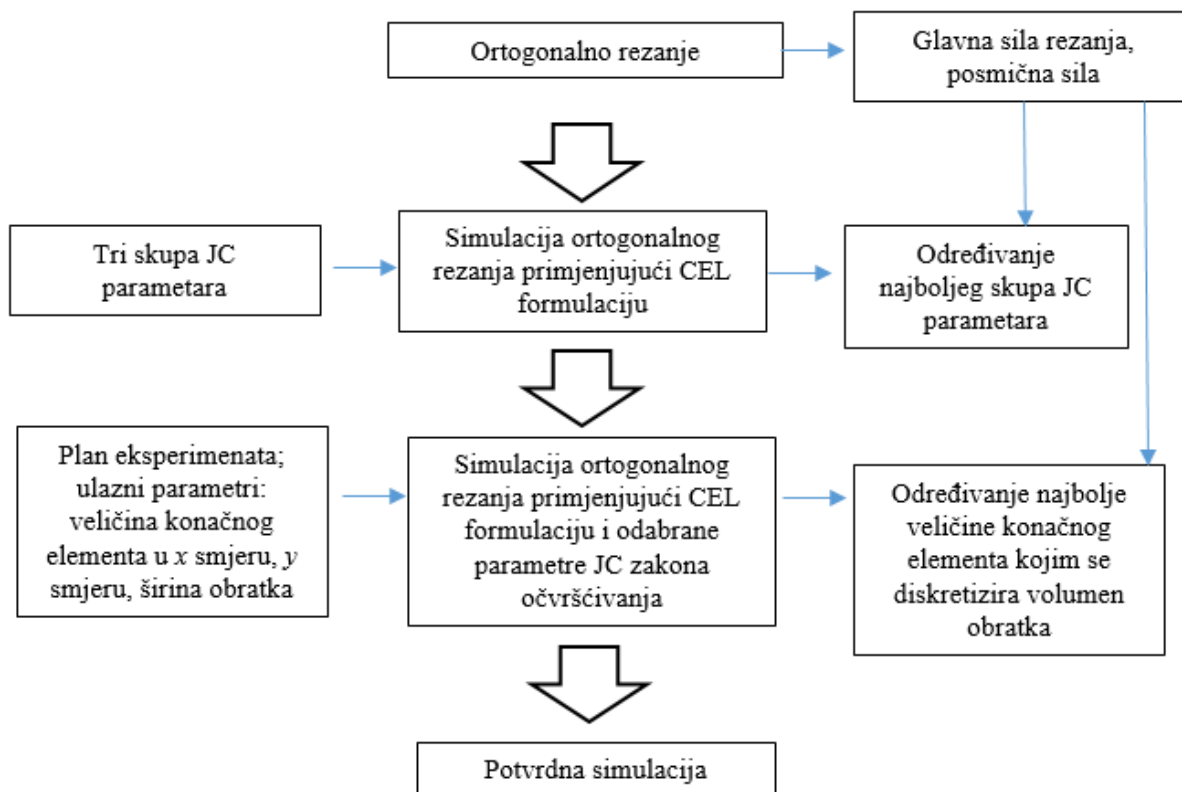
moгу aproksimirati obzirom na pomake primjenom eksplicitne metode centralnih razlika. U ovoj fazi istraživanja nije uključena izmjena topline s okolinom.

Odstupanja u predviđanjima glavne sile rezanja i posmične sile numeričkom analizom u odnosu na eksperimentalne rezultate za različite vrijednosti parametara Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja prikazane su u Tablici 7.4. Zbog postignutog najmanjeg odstupanja u predviđanjima, u daljnjem istraživanju će se primjenjivati parametri iz literature [151]. Vrijednost glavne sile rezanja povezana je s vrijednosti parametra  $A$ , odnosno što je veća vrijednost parametra veća je i predviđena vrijednost glavne sile rezanja.

Tablica 7.4. Usporedba eksperimentalnih rezultata i rezultata numeričkih simulacija

|                           | $F_c$<br>N | Relativna<br>pogreška / % | $F_f$<br>N | Relativna<br>pogreška / % |
|---------------------------|------------|---------------------------|------------|---------------------------|
| JC parametri [149]        | 59,1       | 7,65                      | 29,9       | -5,83                     |
| JC parametri [150]        | 90,4       | 64,66                     | 50,2       | 58,36                     |
| JC parametri [151]        | 51,3       | -6,50                     | 29,8       | -5,99                     |
| Eksperimentalni rezultati | 54,9       |                           | 31,7       |                           |

Nakon utvrđivanja najprikladnijih parametara JC zakona očvršćivanja, cilj je definirati optimalnu veličinu konačnih elemenata. Prema literaturi, veliki utjecaj na rezultate simulacija te na vrijeme potrebno za provedbu simulacije ima veličina konačnog elementa kojim se diskretizira volumen obratka. Zbog toga će se provesti dodatne simulacije gdje će se varirati ulazne veličine: veličina elemenata u smjeru osi  $x$ , smjeru osi  $y$  i širina sirovca u smjeru osi  $z$ . Rezultati predviđanja glavne sile rezanja i posmične sile u simulacijama će se usporediti s rezultatima eksperimenata prikazanim u poglavlju 5. Koraci za definiranje odgovarajućih ulaznih parametara i numeričkih postavki za modeliranje procesa su prikazani na Slici 7.3.



Slika 7.3. Koraci za definiranje odgovarajućih ulaznih parametara i numeričkih postavki za modeliranje obrade odvajanjem čestica

Područje plana virtualnih eksperimenata određeno je na temelju pregleda literature (poglavlje 4.) te je odabran Box-Behnkenov plan eksperimenata. Tri ulazne veličine varirane na tri razine formiraju plan od 17 eksperimenata, Tablica 7.5. Veličina Eulerovih elemenata u smjeru osi  $z$  je konstantna i iznosi  $5 \mu\text{m}$ . Ostali ulazni parametri i numeričke postavke su nepromijenjeni.

Tablica 7.5. Ulazne veličine i njihove razine

|   | Razina 1 | Razina 2 | Razina 3 |
|---|----------|----------|----------|
| Veličina elemenata u smjeru osi $x$ / $\mu\text{m}$ | 2        | 6        | 10       |
| Veličina elemenata u smjeru osi $y$ / $\mu\text{m}$ | 2        | 6        | 10       |
| Širina sirovca u smjeru osi $z$ / $\mu\text{m}$     | 2        | 51       | 100      |

Plan virtualnih simulacija je dobiven korištenjem softvera Design Expert, Tablica 7.6. U Tablici 7.6. prikazane su vrijednosti ulaznih veličina. Odzivne veličine su pogreška u predviđanju glavne sile rezanja ( $F_{c,e}$ ), pogreška u predviđanju posmične sile ( $F_{f,e}$ ) te vrijeme potrebno za provedbu simulacije. CPU vrijeme podrazumijeva vrijeme potrebno da bi se opisao proces koji traje  $9 \cdot 10^{-5}$  s.

Tablica 7.6. Box-Behnkenov plan simulacija (virtualni eksperimenti)

| Redni broj | $x$<br>$\mu\text{m}$ | $y$<br>$\mu\text{m}$ | $z$<br>$\mu\text{m}$ | Broj elemenata obratka | CPU vrijeme s | $F_c$<br>N/mm | $F_{c,e}$<br>% | $F_f$<br>N/mm | $F_{f,e}$<br>% |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| 1          | 6                    | 6                    | 51                   | 68890                  | 5553          | 52,17         | -4,97          | 33,18         | 4,75           |
| 2          | 6                    | 10                   | 2                    | 4150                   | 4024          | 50,65         | -7,74          | 34,56         | 9,09           |
| 3          | 2                    | 2                    | 51                   | 1562500                | 282629        | 49,80         | -5,59          | 30,15         | -4,82          |
| 4          | 10                   | 10                   | 51                   | 12500                  | 958           | 56,83         | 3,52           | 35,50         | 12,05          |
| 5          | 2                    | 10                   | 51                   | 125000                 | 26413         | 55,90         | 1,82           | 28,02         | -11,55         |
| 6          | 10                   | 2                    | 51                   | 125000                 | 23832         | 51,78         | -5,68          | 30,61         | -3,37          |
| 7          | 10                   | 6                    | 2                    | 4150                   | 4831          | 51,39         | -6,39          | 38,27         | 20,82          |
| 8          | 6                    | 2                    | 100                  | 415000                 | 68536         | 50,38         | -8,23          | 29,10         | -8,13          |
| 9          | 10                   | 6                    | 100                  | 83000                  | 7504          | 53,99         | -1,65          | 30,44         | -3,92          |
| 10         | 6                    | 6                    | 51                   | 68890                  | 5553          | 52,17         | -4,97          | 33,18         | 4,75           |
| 11         | 6                    | 10                   | 100                  | 83000                  | 6464          | 53,53         | -2,50          | 31,15         | -1,68          |
| 12         | 6                    | 6                    | 51                   | 68890                  | 5553          | 52,17         | -4,97          | 33,18         | 4,75           |
| 13         | 6                    | 6                    | 51                   | 68890                  | 5553          | 52,17         | -4,97          | 33,18         | 4,75           |
| 14         | 2                    | 6                    | 100                  | 415000                 | 75770         | 52,41         | -4,53          | 29,78         | -6,01          |
| 15         | 6                    | 2                    | 2                    | 20750                  | 7490          | 51,62         | -5,98          | 35,21         | 11,14          |
| 16         | 2                    | 6                    | 2                    | 20750                  | 7712          | 52,77         | -3,87          | 33,53         | 5,84           |
| 17         | 6                    | 6                    | 51                   | 68890                  | 5553          | 52,17         | -4,97          | 33,18         | 4,75           |

## 7.1. Statistička obrada rezultata simulacija

U nastavku su prezentirani rezultati statističke obrade rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem ortogonalnog rezanja.

### 7.1.1. Matematički modeli komponenti sile ortogonalnog rezanja

Nakon odabira oblika modela provedena je analiza varijance (ANOVA) formiranih modela. U Tablici 7.7. je predstavljena analiza varijance za pogrešku u predviđanju glavne sile rezanja  $F_c$ .  $F$ -vrijednost modela iznosi 259,89 i ukazuje na značajnost modela. Vjerojatnost pojave tako velike  $F$ -vrijednosti uslijed šuma iznosi 0,01 %. „ $Prob > F^*$ “ vrijednost za model i sve članove je manja od 0,05 što ukazuje na značajnost modela i svih članova. Važno je naglasiti da je u ovom slučaju izabran polinom trećeg reda jer s polinomom drugog reda se nije mogla postići signifikantnost modela.

Tablica 7.7. Analiza varijance za pogrešku u predviđanju glavne sile rezanja  $F_c$ 

|                      | Br. stupnjeva slobode | Suma kvadrata odstupanja | Srednji kvadrat odstupanja | F-vrijednost | Prob>F  |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|--------------|---------|
| Model                | 10                    | 148,92                   | 14,89                      | 259,89       | <0,0001 |
| $x$                  | 1                     | 0,4851                   | 0,4851                     | 8,47         | 0,0270  |
| $y$                  | 1                     | 3,94                     | 3,94                       | 68,76        | 0,0002  |
| $z$                  | 1                     | 6,25                     | 6,25                       | 109,03       | <0,0001 |
| $xy$                 | 1                     | 0,8010                   | 0,8010                     | 13,98        | 0,0096  |
| $xz$                 | 1                     | 7,29                     | 7,29                       | 127,22       | <0,0001 |
| $yz$                 | 1                     | 14,03                    | 14,03                      | 244,75       | <0,0001 |
| $x^2$                | 1                     | 31,73                    | 31,73                      | 553,65       | <0,0001 |
| $y^2$                | 1                     | 2,32                     | 2,32                       | 40,51        | 0,0007  |
| $z^2$                | 1                     | 14,96                    | 14,96                      | 261,08       | <0,0001 |
| $x^2y$               | 1                     | 19,97                    | 19,97                      | 348,51       | <0,0001 |
| Ostatak              | 6                     | 0,3438                   | 0,0573                     |              |         |
| Odstupanje od modela | 2                     | 0,3438                   | 0,1719                     |              |         |
| Čista pogreška       | 4                     | 0,00                     | 0                          |              |         |
| Ukupno               | 16                    | 149,27                   |                            |              |         |

Matematički model za izračunavanje pogreške u predviđanju glavne sile rezanja  $F_c$  ima oblik:

$$\begin{aligned}
 F_{c,e} = & -6,57017 + 1,03872x + 0,813705y - 0,000533z \\
 & - 0,124687x^2 + 0,046406y^2 - 0,000785z^2 \\
 & - 0,564531xy + 0,0068881xz + 0,009554yz \\
 & + 0,049375x^2y
 \end{aligned}
 \tag{7.1}$$

U Tablici 7.8. su prikazani rezultati regresijske analize za pogrešku u predviđanju glavne sile rezanja  $F_c$ . Koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9977$  pokazuje da je model reprezentativan. Razlika između  $R_{adj}^2$  i  $R_{pred}^2$  je manja od 0,2, a adekvatna preciznost je veća od traženog minimuma koji iznosi četiri.

Tablica 7.8. Rezultati regresijske analize za pogrešku u predviđanju glavne sile rezanja  $F_c$ 

|                      |         |
|----------------------|---------|
| $R^2$                | 0,9977  |
| $R_{adj}^2$          | 0,9939  |
| $R_{pred}^2$         | 0,9079  |
| Adekvatna preciznost | 59,5011 |

Nakon odabira oblika modela provedena je analiza varijance (ANOVA) formiranih modela. U Tablici 7.9. je predstavljena analiza varijance za pogrešku u predviđanju posmične sile  $F_f$ .  $F$ -vrijednost modela iznosi 54,53 i ukazuje na značajnost modela. Vjerojatnost pojave tako velike  $F$ -vrijednosti uslijed šuma iznosi 0,01 %. „ $Prob>F$ “ vrijednost za model i sve članove je manja od 0,05 što ukazuje na značajnost modela i svih članova.

Tablica 7.9. Analiza varijance za pogrešku u predviđanju posmične sile  $F_f$

|                      | Br. stupnjeva slobode | Suma kvadrata odstupanja | Srednji kvadrat odstupanja | $F$ -vrijednost | $Prob>F$ |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------|----------|
| Model                | 9                     | 1095,27                  | 121,70                     | 54,53           | <0,0001  |
| $x$                  | 1                     | 221,76                   | 221,76                     | 99,36           | <0,0001  |
| $y$                  | 1                     | 21,42                    | 21,42                      | 9,60            | 0,0174   |
| $z$                  | 1                     | 554,94                   | 554,94                     | 248,64          | <0,0001  |
| $xy$                 | 1                     | 122,66                   | 122,66                     | 54,96           | 0,0001   |
| $xz$                 | 1                     | 41,54                    | 41,54                      | 18,61           | 0,0035   |
| $yz$                 | 1                     | 18,06                    | 18,06                      | 8,09            | 0,0249   |
| $x^2$                | 1                     | 27,33                    | 27,33                      | 12,24           | 0,0100   |
| $y^2$                | 1                     | 71,64                    | 71,64                      | 32,10           | 0,0008   |
| $z^2$                | 1                     | 16,51                    | 16,51                      | 7,40            | 0,0298   |
| Ostatak              | 7                     | 15,62                    | 2,23                       |                 |          |
| Odstupanje od modela | 3                     | 15,62                    | 5,21                       |                 |          |
| Čista pogreška       | 4                     | 0,00                     | 0,00                       |                 |          |
| Ukupno               | 16                    | 1110,89                  |                            |                 |          |

Matematički model za izračunavanje pogrešku u predviđanju posmične sile  $F_f$  ima oblik:

$$\begin{aligned}
 F_{f,e} = & 0,944561 + 1,98882x + 0,873316y - 0,220493z \\
 & - 0,159219x^2 - 0,257813y^2 + 0,000825z^2 \\
 & + 0,346094xy - 0,016441xz + 0,010842yz
 \end{aligned}
 \quad (7.2.)$$

U Tablici 7.10. su prikazani rezultati regresijske analize za pogrešku u predviđanju posmične sile  $F_f$ . Koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9859$  pokazuje da je model reprezentativan.

Tablica 7.10. Rezultati regresijske analize za pogrešku u predviđanju posmične sile  $F_f$

|                      |         |
|----------------------|---------|
| $R^2$                | 0,9859  |
| $R_{adj}^2$          | 0,9679  |
| $R_{pred}^2$         | 0,7750  |
| Aдекватna preciznost | 28,0041 |

### 7.1.2. Matematički model vremena potrebnog za provedbu simulacije

Usvojena je linearna jednadžba za opisivanja ovisnosti CPU vremena ( $t$ ) o broju elemenata sirovca ( $N$ ):

$$t = 0,003N - 10,839 \quad (7.3.)$$

## 7.2. Optimizacija veličine konačnog elementa kojim se diskretizira obradak genetskim algoritmom

U nastavku je provedena optimizacija veličine konačnih elemenata u smjeru osi  $x$ , smjeru osi  $y$  i širine sirovca u smjeru osi  $z$  kako bi se postigle što manje pogreške u predviđanjima sila rezanja te što manje vrijeme potrebno za provedbu simulacije. Izvedena je višeciljna optimizacija na temelju matematičkih modela dobivenih u poglavlju 7.1. Elementi funkcije cilja su: minimalna pogreška u predviđanju glavne sile rezanja, minimalna pogreška u predviđanju posmične sile te minimalno vrijeme potrebno za provedbu simulacije. Primjenom težinskih faktora, pridijeljena je jednaka važnost svim elementima funkcije cilja te se problem optimizacije formulira na sljedeći način:

$$\text{Minimizirati: } f(x) = w_1 \frac{\sqrt{(F_{c,e})^2}}{F_{c,e}^*} + w_2 \frac{\sqrt{(F_{f,e})^2}}{F_{f,e}^*} + w_3 \frac{CPU}{CPU^*} \quad (7.4.)$$

gdje su:

$w_1, w_2, w_3$  – težinski faktori,  $w_1 + w_2 + w_3 = 1$

$F_{c,e}^*$  - ciljna vrijednost, pogreška u predviđanju glavne sile rezanja

$F_{f,e}^*$  - ciljna vrijednost, pogreška u predviđanju posmične sile

$CPU^*$  - ciljna vrijednost, CPU.

Težinski faktor, ciljne vrijednosti te ograničenja su navedeni u Tablici 7.11. Parametri genetskog algoritma su: veličina populacije - 500, broj generacija - 500, vjerojatnost križanja – 0,75.

Utvrđeno je da su optimalne vrijednosti ulaznih veličina:

veličina konačnog elementa kojim se diskretizira volumen obratka u smjeru osi  $x$  - 8  $\mu\text{m}$

veličina konačnog elementa kojim se diskretizira volumen obratka u smjeru osi  $y$  - 10  $\mu\text{m}$

širina sirovca u smjeru osi  $z$  - 84  $\mu\text{m}$ .

Predviđene vrijednosti izlaznih veličina za optimalne vrijednosti ulaznih veličina su:

pogreška u predviđanju glavne sile rezanja: 0,04 %

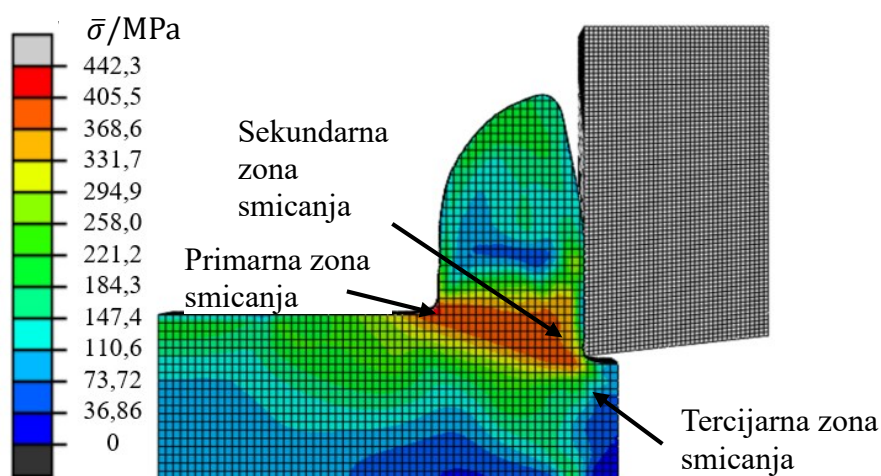
pogreška u predviđanju posmične sile: 2,66 %.

Tablica 7.11. Vrijednosti parametara korištenih u optimizaciji

|                   |         |
|-------------------|---------|
| $w_1, w_2, w_3$   | 0,333   |
| $x / \mu\text{m}$ | 2 - 10  |
| $y / \mu\text{m}$ | 2 - 10  |
| $z / \mu\text{m}$ | 2 - 100 |
| $F_{c,e}^* / \%$  | 1,65    |
| $F_{f,e}^* / \%$  | 1,68    |
| CPU*/s            | 958     |

### 7.3. Numerička provjera rezultata optimizacije

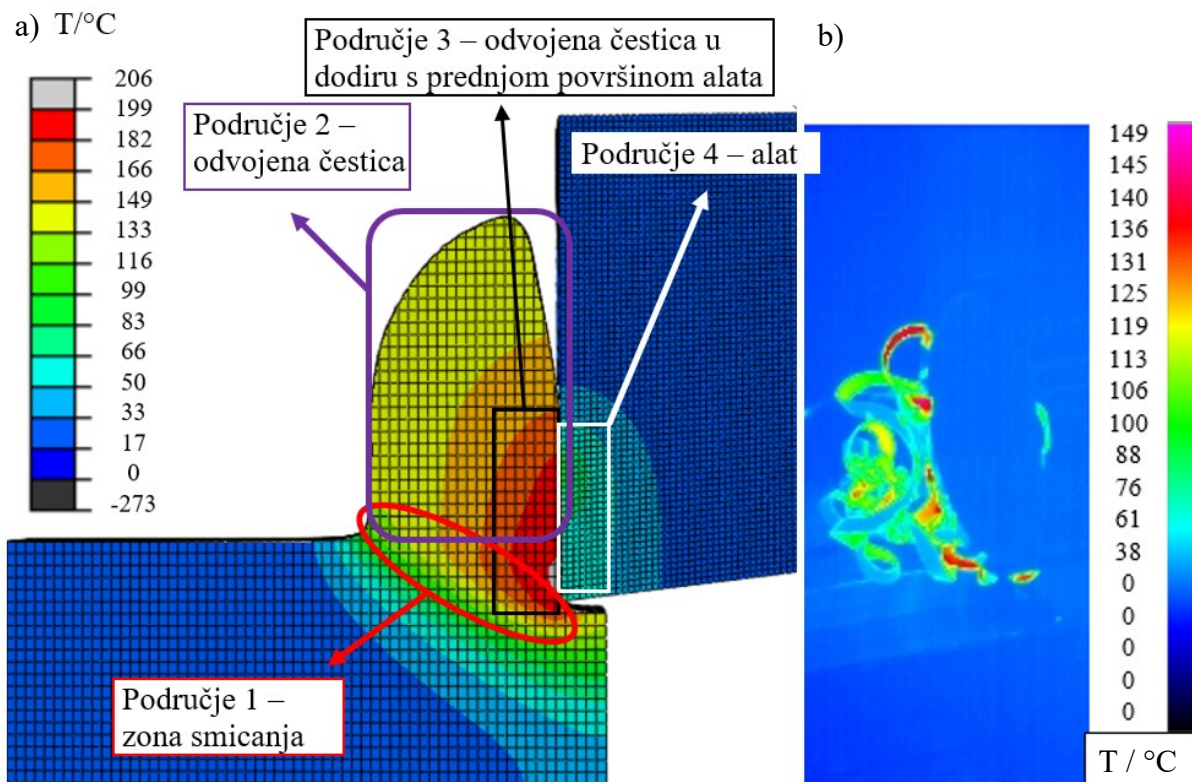
Nakon što su definirane optimalne vrijednosti ulaznih veličina, sljedeći korak je ispitivanje odabranih optimalnih parametara. Osim toga, kako bi se potvrdila prikladnost uporabe CEL formulacije u simulaciji ortogonalnog rezanja, promatrane su temperature u zoni rezanja. U potvrdnoj simulaciji primijenjen je koeficijent prijelaza topline kako bi se uzela u obzir izmjena topline obratka i alata s okolinom. Pretpostavlja se da je koeficijent prijelaza topline  $100 \text{ kW/m}^2\text{K}$  što je u skladu s teorijskim i numeričkim istraživanjima Iqbala i suradnika [158]. Zračenje je neznatno [142] pa se ovaj prijelaz topline zanemaruje. Početna temperatura alata i obratka je  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Rezultati simulacije ortogonalnog rezanja s raspodjelom ekvivalentnog von Mises napreznja prikazani su na Slici 7.4.



Slika 7.4. Prikaz raspodjele ekvivalentnog von Mises napreznja

Najveće vrijednosti ekvivalentnog napreznja pojavljuju se u zoni smicanja te na dodiru s prednjom površinom alata što je u skladu s teorijskim saznanjima predstavljenim u poglavlju 3.

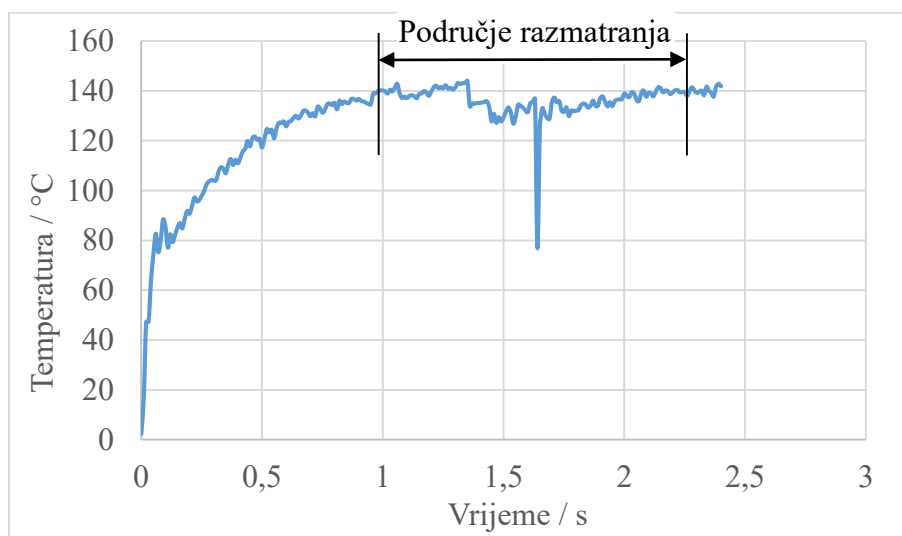
Obzirom da se za razliku od eksperimentalnih mjerenja u simulacijama može odrediti temperatura pojedinih područja u zoni rezanja (npr. prednja površina alata, zona smicanja, odvojena čestica, itd.), važno je odrediti ispravno područje u zoni rezanja (u numeričkim simulacijama) koje će biti usporedivo s eksperimentalnim rezultatima, Slika 7.5. Sa Slika 7.5. se može uočiti da se najveća temperatura nalazi na dodiru odvojene čestice i prednje površine alata i iznosi  $206\text{ }^{\circ}\text{C}$ . U zoni smicanja je prosječna temperatura u vremenu  $163\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a prosječna temperatura odvojene čestice u vremenu je  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zbog trenja na prednjoj površini alata, prosječna temperatura odvojene čestice u dodiru s prednjom površinom alata je veća i iznosi  $179\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Obzirom da je potrebno određeno vrijeme za prijelaz topline iz zona viših temperatura (odvojena čestica) u alat gdje su niže temperature, prosječna temperatura na prednjoj površini alata je najmanja i iznosi  $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Razlika u temperaturnim poljima na prednjoj površini alata i u odvojenoj čestici je posljedica kratkog vremena simulacije te se ne može postići ravnotežno stanje u alatu.



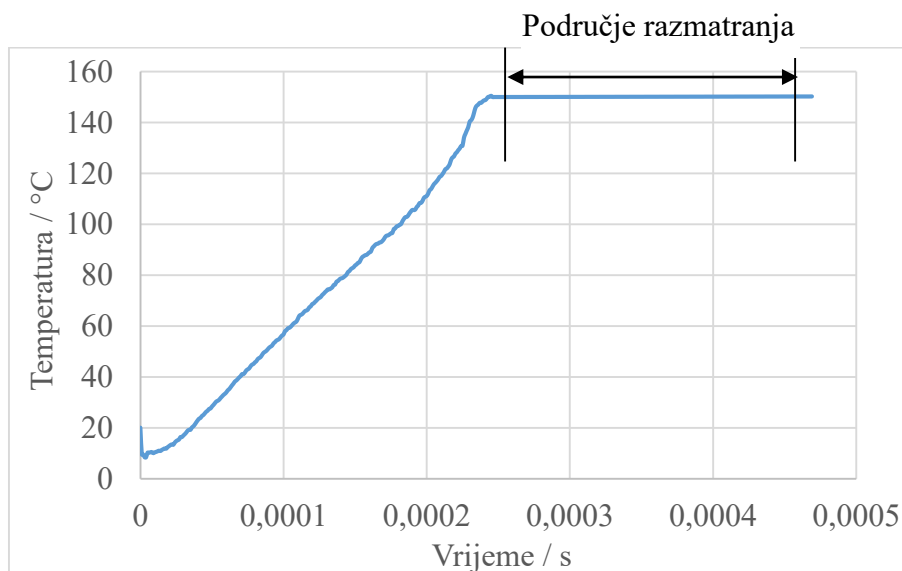
Slika 7.5. Raspodjela temperature u zoni rezanja: a) rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem, b) eksperimentalni rezultati



Eksperimentalni rezultati temperature u zoni rezanja u vremenu prikazani su na Slici 7.6. Eksperimentalna prosječna vrijednost temperature u zoni rezanja je 137 °C. Srednja temperatura odvojene čestice najbolje se podudara s eksperimentalnim rezultatima. Rezultati srednje temperature odvojene čestice u vremenu dobiveni numeričkim modeliranjem su prikazani na Slici 7.7. U potvrđnoj simulaciji prosječna temperatura odvojene čestice je 150 °C. Također je važno uočiti da u numeričkim simulacija ravnotežno stanje nastupa već nakon 0,2 ms dok je u eksperimentalnim mjerenjima ravnotežno stanje nastupilo nakon 1 s.



Slika 7.6. Temperatura u zoni rezanja: eksperimentalni rezultati



Slika 7.7. Temperatura u zoni rezanja: rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem

Rezultati potvrđne simulacije promatrajući komponente sile rezanja su: glavna sila rezanja 54,31 N/mm (relativna pogreška 1,07 %), posmična sila 30,71 N/mm (relativna pogreška

3,12 %). Primjenom optimalne kombinacije veličine konačnog elementa kojim se diskretizira obradak se smanjila pogreška u predviđanju komponenti sile rezanja. Kako je u potvrđnoj simulaciji uključena izmjena topline s okolinom, vrijeme potrebno za provedbu simulacije je povećano te zbog toga više nije razmatrano.

U ovom poglavlju su prikazani i uspoređeni eksperimentalni rezultati i rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem ortogonalnog rezanja aluminijske legure za  $v_c=186$  m/min te  $f=0,05$  mm/o. Može se zaključiti da se uz odgovarajući zakon očvršćivanja, kriterij za nastajanje odvojene čestice, rubne uvjete i veličinu mreže mogu uspješno predvidjeti sile rezanja i temperatura u zoni rezanja. Međutim, potrebno je istražiti ovu metodu na širem rasponu brzina rezanja i posmaka. Navedeno je prezentirano u sljedećem poglavlju.

## 8. NUMERIČKA ANALIZA: PROCJENA TOČNOSTI PREDVIĐANJA SILA REZANJA I TEMPERATURE U ZONI REZANJA ZA RAZLIČITE ULAZNE PARAMETRE

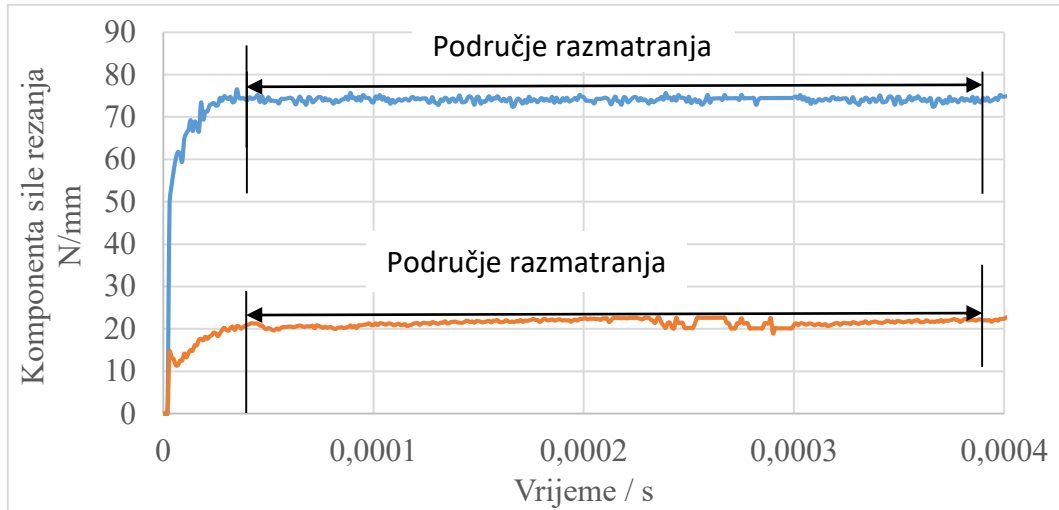
Nakon odabira prikladnih numeričkih postavki, cilj je primijeniti iste za različite parametre obrade. Zbog toga su za definirane vrijednosti parametara JC zakona očvršćivanja, ekvivalentnog plastičnog pomaka i veličine konačnog elementa, provedene simulacije prema planu eksperimenata definiranom u poglavlju 5 (Tablica 5.6.), bez ponavljanja u nultoj točki. Ulazni parametri i postavke numeričkih modela su slične kao u poglavlju 7. Mehaničke i toplinske karakteristike materijala obratka te materijala alata preuzete su iz literatura, Tablica 5.2. Geometrija alata je jednaka geometriji alata primijenjenoj u eksperimentalnim ispitivanjima ( $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ). Model alata je diskretiziran trodimenzijskim konačnim elementima C3D8RT, a model obratka je diskretiziran trodimenzijskim Eulerovim elementima EC3D8RT. Veličina Eulerovih elemenata u smjeru osi  $x$  je  $8 \mu\text{m}$ , u smjeru osi  $y$  je  $10 \mu\text{m}$  te je širina sirovca u smjeru osi  $z$   $84 \mu\text{m}$ . Veličina elemenata obratka u smjeru osi  $z$  je konstantna i iznosi  $5 \mu\text{m}$ . Prosječna veličina konačnog elementa kojim se diskretizira volumen alata je  $5 \mu\text{m}$  u svim smjerovima. Debljina neodrezane odvojene čestice jednaka je posmaku te se njene vrijednosti mijenjaju prema planu eksperimenata (Tablica 5.6.). Vrijednosti brzine rezanja se također mijenjaju prema istom planu eksperimenata. Za opis ponašanja materijala obratka primijenjen je JC zakona očvršćivanja. Najprikladnije vrijednosti ovog zakona očvršćivanja su istražene i definirane u poglavlju 7 (vrijednost parametara preuzeta iz [151]). U ovoj fazi istraživanja je primijenjena konvencionalna metoda gdje je primijenjen Johnson-Cookov model inicijacije kao kriterij za modeliranje stvaranja inicijalnog oštećenja. Za razvoj oštećenja do krajnjeg loma je primijenjen model temeljen na ekvivalentnom plastičnom pomaku, Tablica 7.2. Značajke interakcije između obratka i alata su prikazane u Tablici 7.3. Obzirom da je primijenjen Zorevljev model trenja, metodom pokušaja i pogreške su određene vrijednosti smične granice tečenja obratka za sve kombinacije parametara obrade. Koeficijent prijelaza topline između obratka i okoline te alata i okoline je  $100 \text{ kW/m}^2\text{K}$ .

### 8.1. Rezultati numeričke analize

Za svaku simulaciju potrebno je izračunati srednju vrijednost komponenti sile rezanja u području gdje su vrijednosti ustaljene. Komponente sile ortogonalnog rezanja su dobivene kao

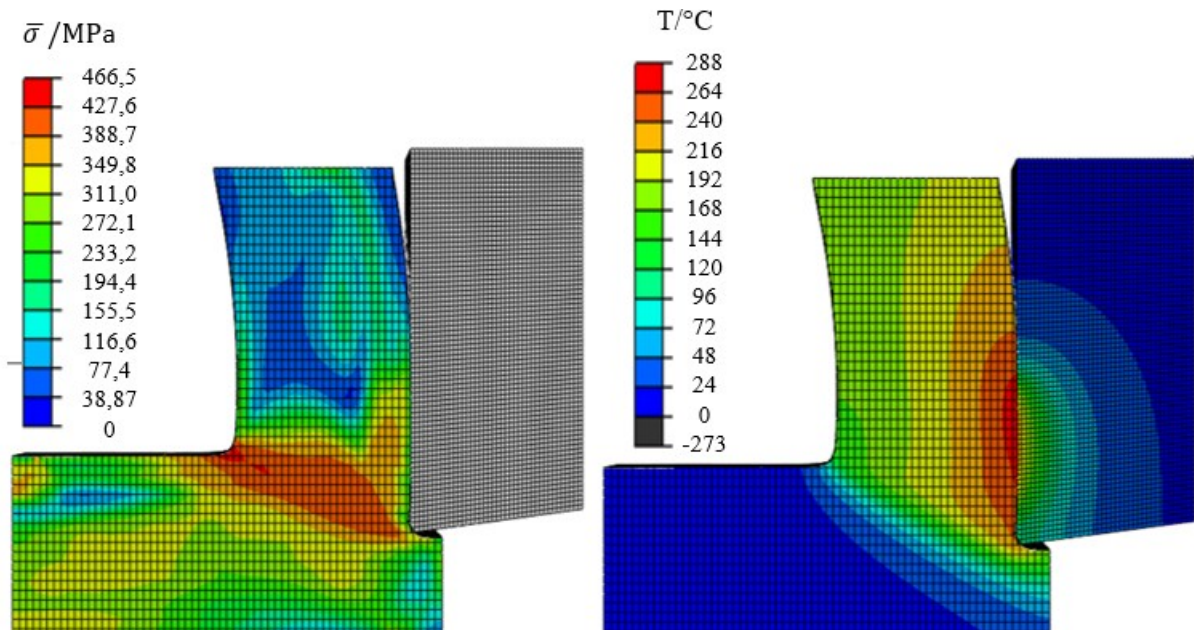
8. Numerička analiza: procjena točnosti predviđanja sila rezanja i temperature u zoni rezanja za različite ulazne parametre

srednja vrijednost najmanje 200 vrijednosti. Na Slici 8.1. prikazan je primjer rezultata glavne sile rezanja i posmične sile u vremenu dobivenih numeričkim modeliranjem. Srednje vrijednosti komponenti sile rezanja za definirano područje razmatranja su:  $F_c = 74$  N/mm,  $F_f = 23$  N/mm.



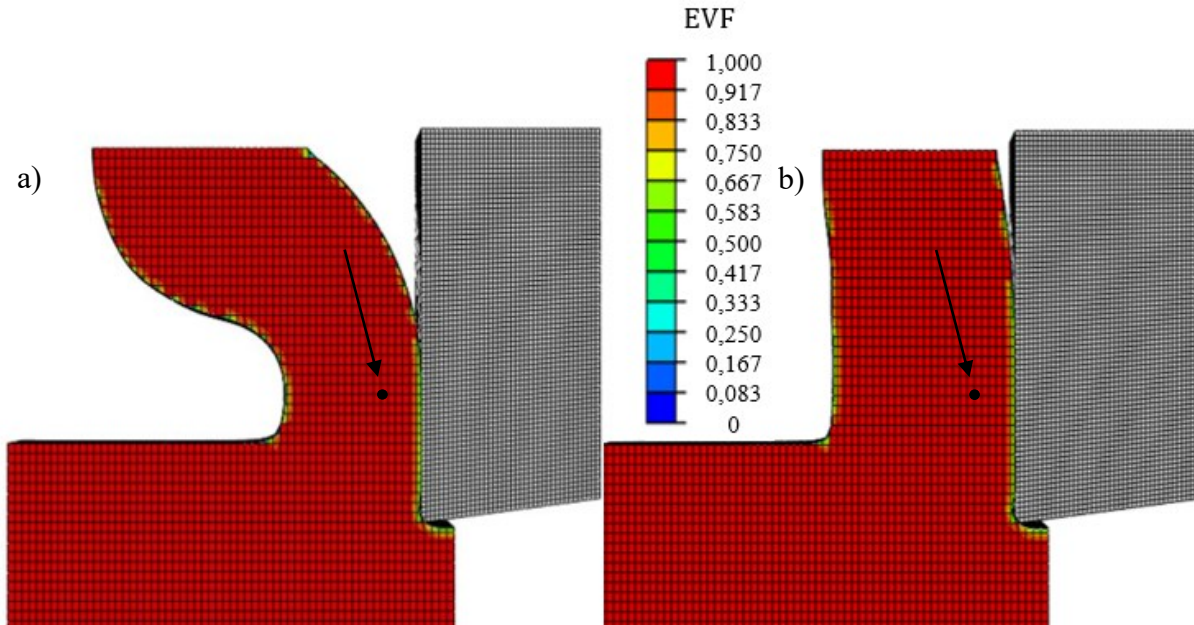
Slika 8.1. Rezultati dobiveni numeričkim postupkom; sile rezanja u funkciji vremena za  $v_c=373$  m/min,  $f = 0,08$  mm/o

Na Slici 8.2. prikazana je raspodjela ekvivalentnog von Mises naprezanja u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja.



Slika 8.2. Rezultati dobiveni numeričkim postupkom; raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja za  $v_c=373$  m/min,  $f = 0,08$  mm/o

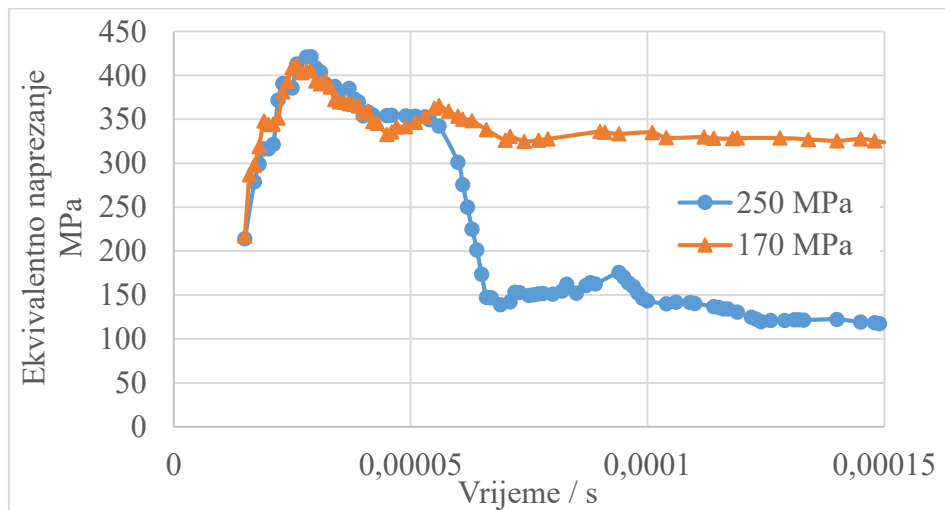
Za isti eksperiment, odnosno parametre obrade, prikazan je izgled odvojene čestice u istom trenutku ( $t = 0,0015$  s) za dva primjera, Slika 8.3. U prvom primjeru je smična granica tečenja 250 MPa dok je u drugom primjeru smična granica tečenja 170 MPa.



Slika 8.3. Izgled odvojene čestice nakon 0,0015 s za  $v_c=373$  m/min,  $f = 0,08$  mm/o:

a)  $\tau_y = 250$  MPa , b)  $\tau_y = 170$  MPa

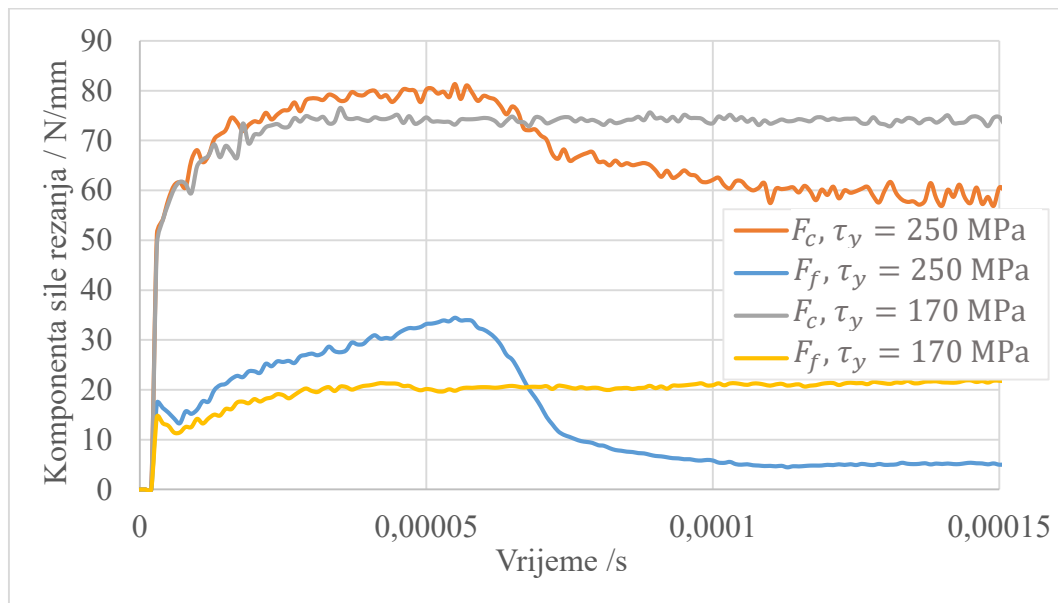
Na Slici 8.4. prikazana je usporedba ekvivalentnog von Mises naprezanja u vremenu za označenu integracijsku točku na Slici 8.3.



Slika 8.4. Usporedba ekvivalentnog naprezanja u vremenu za različite smične granice tečenja za  $v_c=373$  m/min,  $f = 0,08$  mm/o

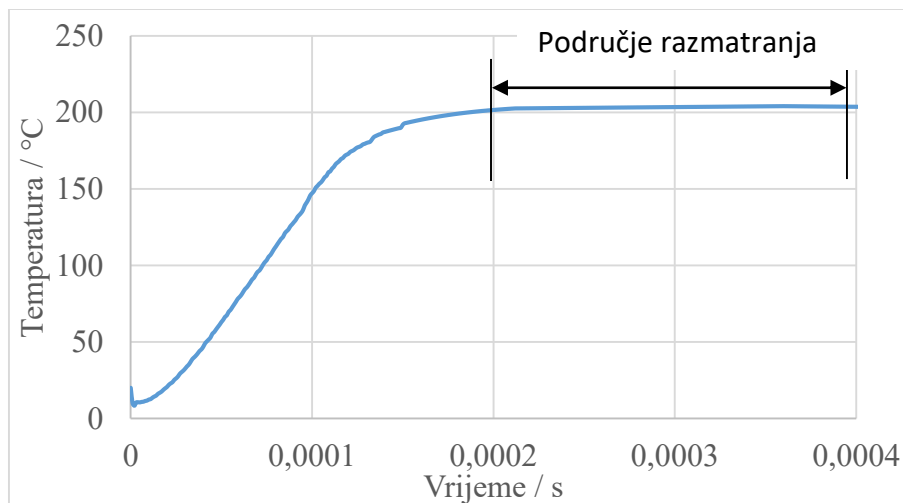
8. Numerička analiza: procjena točnosti predviđanja sile rezanja i temperature u zoni rezanja za različite ulazne parametre

Do naglog pada komponenti sile rezanja dolazi ako je prevelika smična granica tečenja, Slika 8.5. Uzrok tome je što naprezanje postigne veću vrijednost od dozvoljene te dolazi do razvoja oštećenja u materijalu. Odnosno dolazi do pretjeranog omekšavanja materijala. Gubljenje svojstava u materijalu dovodi do smanjenja naprezanja u primarnoj i sekundarnoj zoni smicanja, a time i do pada vrijednosti komponenti sile rezanja bez daljnjeg povećanja.



Slika 8.5. Usporedba komponenti sile rezanja u vremenu za različite smične granice tečenja za  $v_c=373$  m/min,  $f = 0,08$  mm/o

Numeričkim modelom predviđena srednja temperatura odvojene čestice u vremenu je prikazana na Slici 8.6. te iznosi 202 °C.



Slika 8.6. Temperatura u zoni rezanja za  $v_c = 373$  m/min,  $f = 0,08$  mm/o

Kao što je uočeno i u eksperimentalnim ispitivanjima, na početku ortogonalnog rezanja nastala količina topline se povećava do neke maksimalne vrijednosti. Istovremeno se toplina počinje odvoditi odvojenom česticom, obratkom, alatom i okolinom zbog čega nakon određenog vremena nastupa ravnotežno stanje između nastale i odvedene količine topline. Temperatura u zoni rezanja je određena kao srednja vrijednost temperature u odvojenoj čestici u određenom području razmatranja (kada je nastupilo ravnotežno stanje). Za izračun aritmetičke sredine korišteno je najmanje 200 vrijednosti.

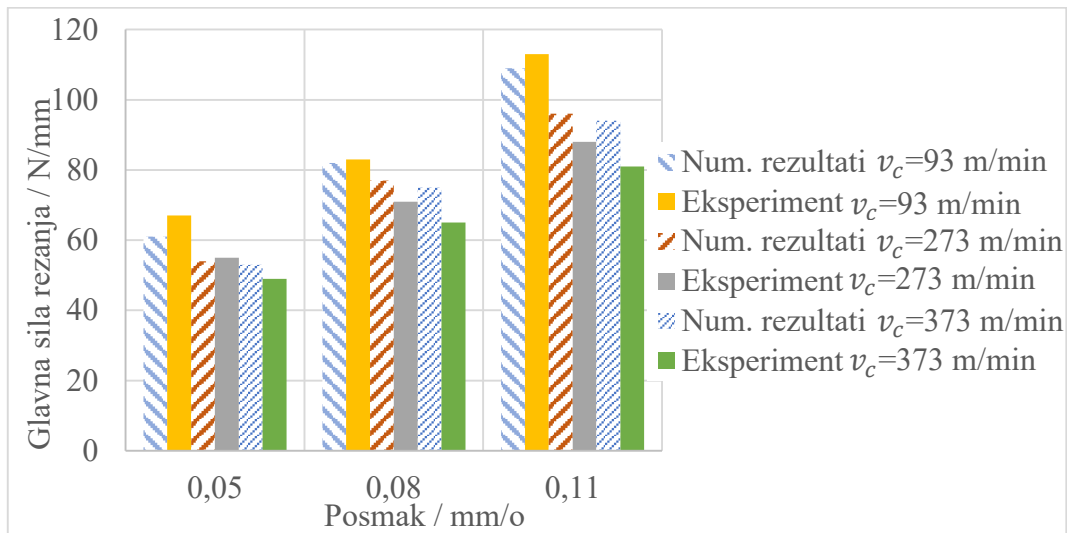
Rezultati komponenti sile rezanja i temperature odvojene čestice za definirani plan numeričkih simulacija prikazani su u Tablici 8.1. U Tablici 8.1. su također prikazane relativne pogreške za promatrane izlazne veličine ortogonalnog rezanja ( $F_{c,e}$ ,  $F_{f,e}$ ,  $T_e$ ). Prosječna relativna pogreška je određena kao srednja vrijednost apsolutnih vrijednosti relativne pogreške za promatranu izlaznu veličinu. Kako se korištenim modelom trenja pretpostavlja konstantna vrijednost smične granice tečenja, a istu je teško procijeniti, za sve razmatrane vrijednosti brzina rezanja i posmaka razmatran je široki raspon vrijednosti iste. Usvojena je vrijednost smične granice tečenja obratka za koju su za razmatranu brzinu rezanja i posmak ostvarena najbolja predviđanja sila rezanja. Prema odabranim vrijednostima smične granice tečenja slijedi da se za manje posmake bolja predviđanja dobiju s većim vrijednostima smične granice tečenja. Za različite brzine rezanja, odabrane vrijednosti smične granice tečenja se manje razlikuju. Zaključeno je da se za veće brzine rezanja bolja predviđanja dobiju s manjim vrijednostima smične granice tečenja što može biti posljedica povećanja temperature.

Tablica 8.1. Ulazne veličine te rezultati numeričkih simulacija

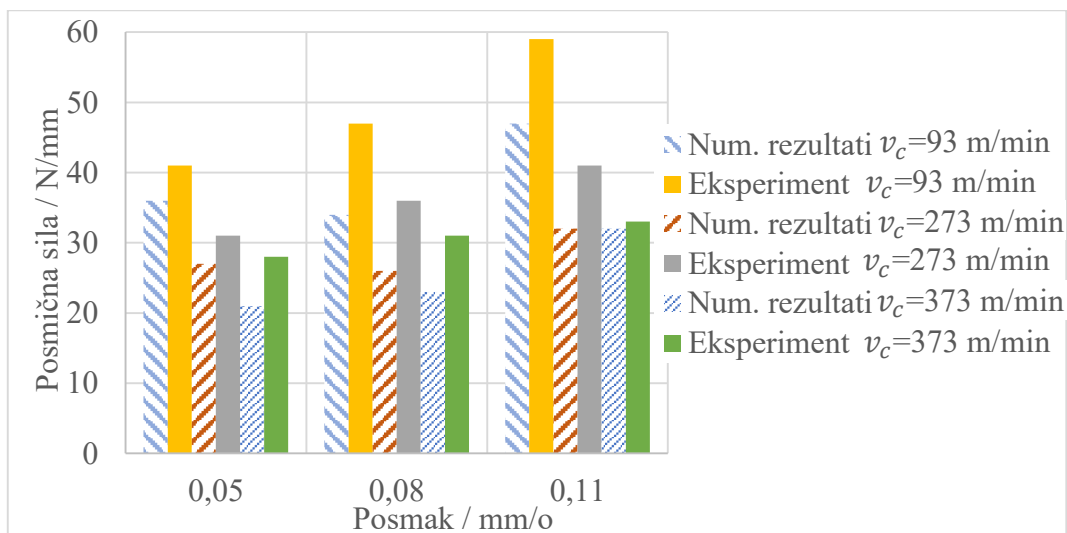
| Redni broj                       | $v_c$<br>m/min | $f$<br>mm/o | $\tau_y$<br>MPa | $F_c$<br>N/mm | $F_{c,e}$<br>% | $F_f$<br>N/mm | $F_{f,e}$<br>% | $T$<br>°C | $T_e$<br>% |
|----------------------------------|----------------|-------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|-----------|------------|
| 1                                | 93             | 0,05        | 300             | 61            | -8,96          | 36            | -12,20         | 123       | 5,13       |
| 2                                | 233            | 0,05        | 290             | 54            | -1,82          | 27            | -12,90         | 171       | 6,88       |
| 3                                | 373            | 0,05        | 290             | 53            | 8,16           | 21            | -25,00         | 179       | -6,77      |
| 4                                | 93             | 0,08        | 200             | 82            | -1,20          | 34            | -27,66         | 132       | 10,92      |
| 5                                | 233            | 0,08        | 200             | 77            | 8,45           | 26            | -27,78         | 177       | 9,26       |
| 6                                | 373            | 0,08        | 170             | 75            | 15,38          | 23            | -25,81         | 202       | 6,32       |
| 7                                | 93             | 0,11        | 180             | 109           | -3,54          | 47            | -20,34         | 138       | 14,05      |
| 8                                | 233            | 0,11        | 150             | 96            | 9,09           | 32            | -21,95         | 186       | 10,06      |
| 9                                | 373            | 0,11        | 150             | 94            | 16,05          | 32            | -3,03          | 200       | 0,00       |
| Prosječna relativna pogreška / % |                |             |                 |               | 8,05           |               | 19,61          |           | 7,71       |

8. Numerička analiza: procjena točnosti predviđanja sila rezanja i temperature u zoni rezanja za različite ulazne parametre

Rezultati numeričkih simulacija su uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima za sve kombinacije razmatranih parametara obrade. Usporedba glavnih sila rezanja za ortogonalno rezanje dobivenih numeričkom analizom (num. rezultati) i eksperimentalnim ispitivanjima je prikazana na Slici 8.7. Usporedba posmičnih sila za ortogonalno rezanje dobivenih numeričkom analizom i eksperimentalnim ispitivanjima je prikazana na Slici 8.8.



Slika 8.7. Usporedba vrijednosti glavne sile rezanja predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti



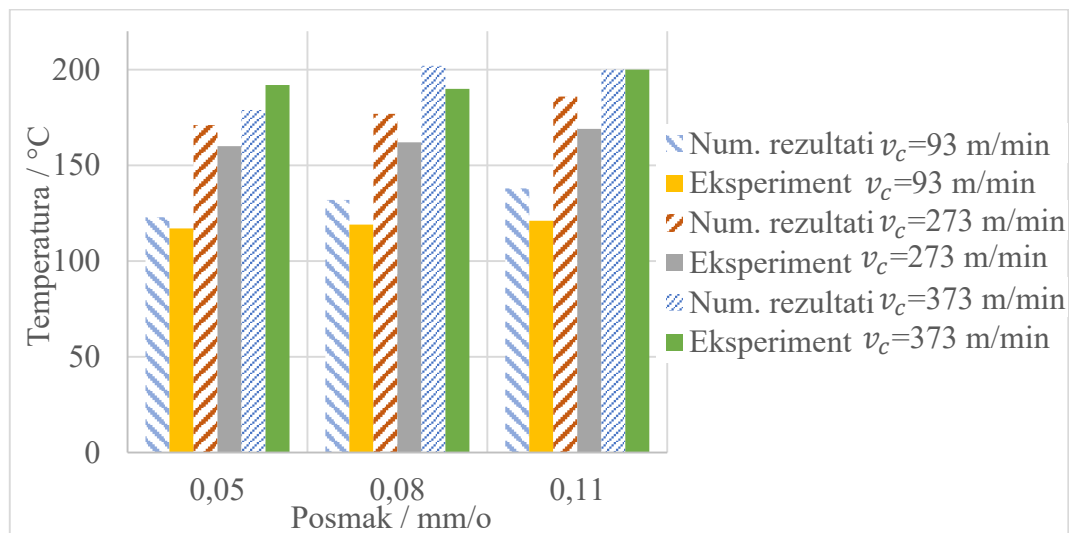
Slika 8.8. Usporedba vrijednosti posmične sile predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti

U skladu s teorijskim i eksperimentalnim ispitivanjima, obje komponente sile rezanja rastu s porastom posmaka, a opadaju s porastom brzine rezanja. Pogreška u predviđanju glavne sile



rezanja je značajnija kod većih brzina. To ukazuje da primijenjeni zakon očvršćivanja nije u potpunosti mogao obuhvatiti omekšavanje materijala uslijed povećanja temperature koje je značajnije kod većih brzina deformacija. Međutim, glavna sila rezanja je dobro predviđena za sve kombinacije ulaznih parametara te je relativna pogreška unutar 16 % ( $v_c = 373$  m/min,  $f = 0,11$  mm/o). U svim simulacijama su posmične sile manje od eksperimentalnih rezultata. Posmične sile su lošije predviđene u odnosu na glavne sile te je maksimalna relativna pogreška 27,78 % ( $v_c = 233$  m/min,  $f = 0,08$  mm/o). Uzrok tome mogu biti definirani uvjeti dodira između obratka i alata. Najbolja predviđanja za obje komponente sile rezanja su za simulaciju pod rednim brojem dva ( $v_c = 233$  m/min,  $f = 0,05$  mm/o). Ovaj rezultat je očekivan jer je optimizacija veličine konačnog elementa kojim se diskretizira obradaka (poglavlje 7) provedena za parametre obrade najbližije parametrima obrade u simulaciji pod rednim brojem dva.

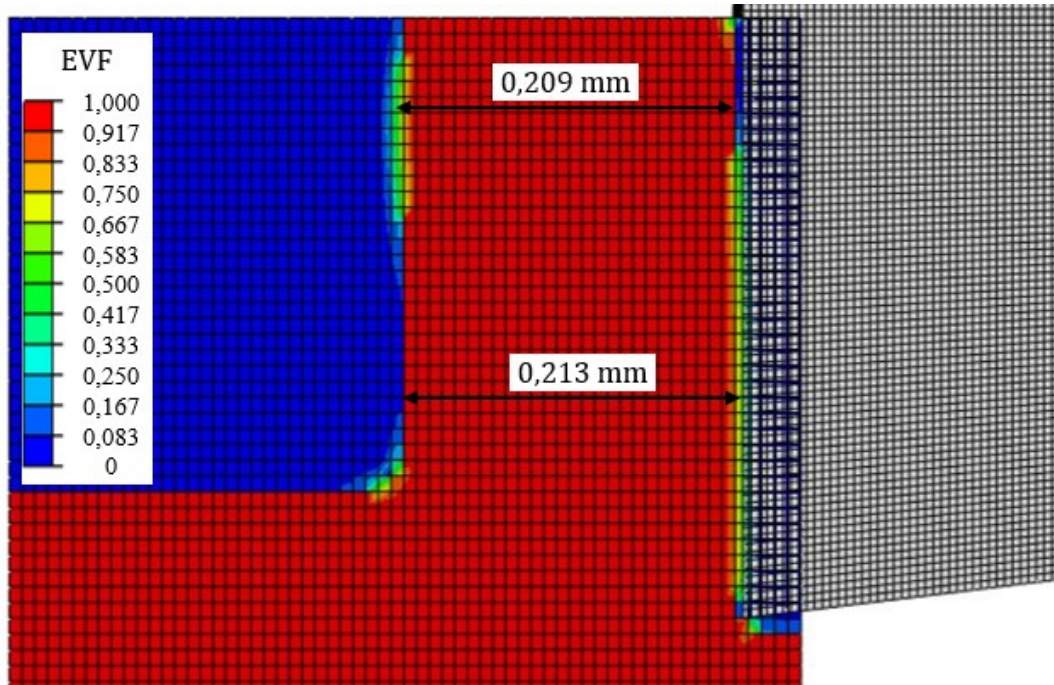
Usporedba temperature u zoni rezanja dobivene numeričkim postupkom i eksperimentalnim ispitivanjima je prikazana na Slici 8.9. U skladu s eksperimentalnim ispitivanjima, temperatura u zoni rezanja značajno raste s porastom brzine rezanja. Međutim, utjecaj porasta temperature nije dovoljan za smanjenje glavne sile rezanja. Temperatura u zoni rezanja je dobro predviđena za sve kombinacije ulaznih parametara te je relativna pogreška unutar 14 %.



Slika 8.9. Usporedba vrijednosti temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti

Kako bi se dodatno potvrdila točnost postavljenog numeričkog modela, u istraživanje je uveden novi izlazni parametar: debljina odvojene čestice. Eksperimentalni rezultati debljine odvojene

čestice su prikazani u Tablici 8.2. U numeričkoj analizi je debljina odvojene čestice određena pomoću već objašnjenog Eulerovog volumnog udjela materijala (poglavlje 4). Na Slici 8.10. prikazan je primjer određivanja debljine odvojene čestice.



Slika 8.10. Primjer raspodjele Eulerovog volumnog udjela materijala za  $v_c = 373 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm/o}$

Usporedba eksperimentalnih i numeričkih modelom predviđenih debljina odvojene čestice za različite parametre obrade je prikazana u Tablici 8.2. Debljina odvojene čestice je dobro predviđena za sve kombinacije ulaznih parametara te je relativna pogreška unutar 16 %.

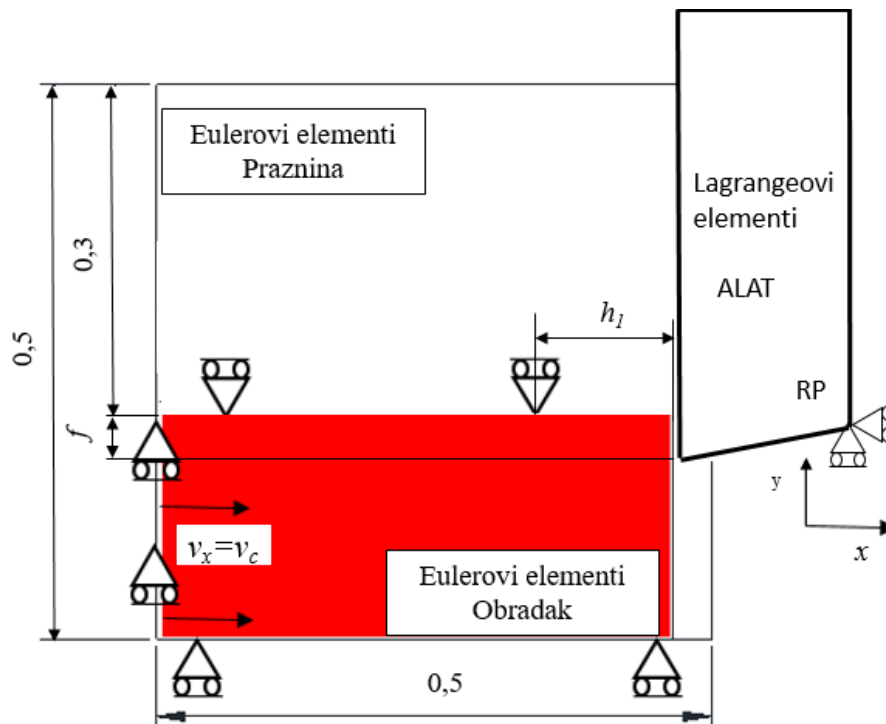
Tablica 8.2. Parametri obrade i rezultati mjerenja debljine odvojene čestice

| $v_c$<br>m/min | $f$<br>mm/o | $h_1$ (eksperiment)<br>mm | $h_1$ (num. rezultati)<br>mm | Relativna pogreška<br>% |
|----------------|-------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 93             | 0,05        | 0,180                     | 0,165                        | -8,33                   |
| 233            | 0,05        | 0,171                     | 0,152                        | -11,11                  |
| 373            | 0,05        | 0,163                     | 0,138                        | -15,34                  |
| 93             | 0,08        | 0,232                     | 0,229                        | -1,29                   |
| 233            | 0,08        | 0,220                     | 0,212                        | -3,64                   |
| 373            | 0,08        | 0,204                     | 0,209                        | 2,45                    |
| 93             | 0,11        | 0,308                     | 0,305                        | -0,97                   |
| 233            | 0,11        | 0,268                     | 0,283                        | 5,60                    |
| 373            | 0,11        | 0,252                     | 0,251                        | -0,40                   |

U ovom poglavlju je primijenjeno i opisano modeliranje ortogonalnog rezanja EN AW 6082 T6 legure u programskom paketu za analizu metodom konačnih elemenata, ABAQUS. Između ostalog, primijenjen je Johnson-Cookov zakon očvršćivanja, Johnson-Cookov model inicijacije kao kriterij za modeliranje stvaranja inicijalnog oštećenja te model baziran na efektivnom razdvajanju za modeliranje razvoja oštećenja do krajnjeg loma i Zorevljev model trenja. Obzirom da mala vrijednost smične granice tečenja obratka dovodi do vrlo male posmične sile te visoka vrijednost smične granice tečenja obratka dovodi do naglog pada glavne sile rezanja bez njenog naknadnog povećanja nužno je definirati optimalnu vrijednost smične granice tečenja što može zahtijevati veliki broj simulacija. Dodatna prepreka je što nema dovoljno dostupnih informacija o modelima koji opisuju oštećenje u materijalu. Također, iako su glavna sila rezanja, temperatura u zoni rezanja te debljina odvojene čestice zadovoljavajuće predviđene, odstupanja posmične sile su do 28 %. Može se zaključiti da je potrebno unaprijediti numerički model što će biti prikazano u sljedećim poglavljima.

## **8.2. Predviđanje sila rezanja i temperature u zoni rezanja za različite ulazne parametre primjenom modificiranog numeričkog modela**

U prethodnom poglavlju je zaključeno da je potrebno uskladiti više ulaznih parametara i postavki numeričkog modela ortogonalnog rezanja kako bi se predvidio realan proces odvajanja čestica. Također, uočeno je da su modeli koji opisuju oštećenje u materijalu, a koji se primjenjuju kao kriteriji za nastajanje odvojene čestice teško dostupni u literaturi. Ako se obradak diskretizira Eulerovim elementima, ne dolazi do distorzije elemenata odnosno mreže. U tom slučaju nije potrebno brisanje elemenata. Također, za aluminijske legure je karakteristična trakasta odvojena čestica. Zbog toga je u prvom koraku unaprjeđenja modela izostavljen model koji opisuje oštećenje u materijalu. Međutim, da bi se simulirao realan proces nastajanja odvojene čestice potrebno je promijeniti rubne uvjete, Slika 8.11. Spriječeni su pomaci na gornjoj strani obratka. Duljina područja gdje nije spriječeno pomicanje gornje strane obratka u smjeru osi  $y$  jednaka je eksperimentalnim mjerenjima debljine odvojene čestice, Tablica 8.2. Važno je napomenuti da su vrijednosti debljina odvojene čestice ili koeficijenti sabijanja odvojene čestice uglavnom lako dostupni u literaturi. Ostale numeričke postavke i ulazni parametri su jednaki onima opisanim u prethodnom poglavlju.



Slika 8.11. Modificirani numerički model; prikaz obratka i alata u  $xy$  ravnini za primjer ortogonalnog rezanja.

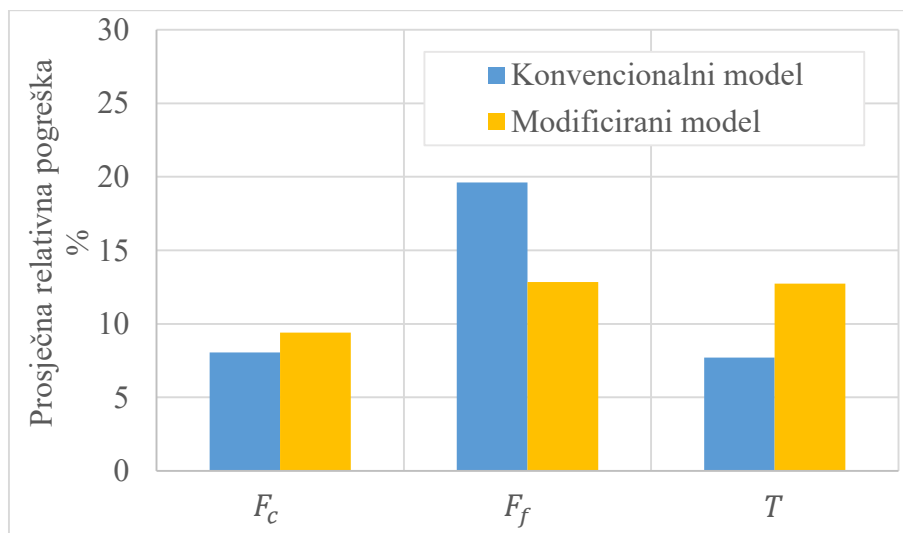
Rezultati komponenti sile rezanja i temperature odvojene čestice za definirani plan numeričkih simulacija prikazani su u Tablici 8.3. U Tablici 8.3. su također prikazane relativne pogreške za promatrane izlazne veličine ortogonalnog rezanja ( $F_{c,e}$ ,  $F_{f,e}$ ,  $T_e$ ). Glavna sila rezanja i posmična sila rastu s porastom posmaka, a opadaju s porastom brzine rezanja. Glavna sila rezanja je dobro predviđena za sve kombinacije ulaznih parametara te je relativna pogreška unutar 15 %. Primjenom modificiranog numeričkog modela pogreška u predviđanju glavne sile rezanja je značajnija kod većih brzina. Uzrok tome je što primijenjeni zakon očvršćivanja ne može u potpunosti obuhvatiti omekšavanje materijala uslijed povećanja temperature koje je uočljivije kod većih brzina deformacija. Posmične sile su lošije predviđene u odnosu na glavne sile. Prosječna relativna pogreška za komponente sile rezanja i temperaturu u zoni rezanja za konvencionalni i modificirani numerički model prikazana je na Slici 8.12. Može se uočiti značajno poboljšanje u predviđanju posmične sile. Uzrok tome je nedovoljno eksperimentalnih podataka za opis oštećenja u materijalu. Kod modificiranog matematičkog modela puno je veći prostor za istraživanje, a time i za unaprjeđenje modela trenja jer nema pojave naglog pada vrijednosti sile bez njihovog daljnjeg povećanja. Usvojene su vrijednosti smične granice tečenja prikazane u Tablici 8.3. za koje se za razmatranu brzinu rezanja i posmak ostvarena najbolja predviđanja sila rezanja. Pri manjim vrijednostima smične granice tečenja

8. Numerička analiza: procjena točnosti predviđanja sila rezanja i temperature u zoni rezanja za različite ulazne parametre

(do 300 MPa) vrijedi odnos  $\tau_Y = \sigma_Y/\sqrt{3}$  što je u skladu s von Misesovom teorijom. Pri manjim brzinama rezanja, bolja predviđanja dobiju se s većim vrijednostima smične granice tečenja. U ovom numeričkom modelu uočeno je da je u većini simulacija glavna sila rezanja veća nego u eksperimentalnim mjerenjima. Vrijednost glavne sile rezanja se može smanjiti smanjenjem smične granice tečenja međutim to uzrokuje i smanjenje posmične sile za iste parametre obrade. Zbog toga je u većini simulacija vrijednost posmične sile manja od eksperimentalnih mjerenja.

Tablica 8.3. Ulazne veličine te rezultati numeričkih simulacija za modificirani numerički model; koeficijent prijelaza topline 100 kW/m<sup>2</sup>K

| Redni broj                       | $v_c$<br>m/min | $f$<br>mm/o | $\tau_Y$<br>MPa | $F_c$<br>N/mm | $F_{c,e}$<br>% | $F_f$<br>N/mm | $F_{f,e}$<br>% | $T$<br>°C | $T_e$<br>% |
|----------------------------------|----------------|-------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|-----------|------------|
| 1                                | 93             | 0,05        | 500             | 66            | -1,49          | 37            | -9,76          | 133       | 13,68      |
| 2                                | 233            | 0,05        | 400             | 60            | 9,09           | 28            | -9,68          | 183       | 14,38      |
| 3                                | 373            | 0,05        | 300             | 56            | 14,29          | 22            | -21,43         | 208       | 8,33       |
| 4                                | 93             | 0,08        | 450             | 89            | 7,23           | 51            | 8,51           | 142       | 19,33      |
| 5                                | 233            | 0,08        | 300             | 80            | 12,68          | 32            | -11,11         | 187       | 15,43      |
| 6                                | 373            | 0,08        | 240             | 73            | 12,31          | 25            | -19,35         | 207       | 8,95       |
| 7                                | 93             | 0,11        | 350             | 113           | 0,00           | 65            | 10,17          | 151       | 24,79      |
| 8                                | 233            | 0,11        | 200             | 100           | 13,64          | 44            | 7,32           | 182       | 7,69       |
| 9                                | 373            | 0,11        | 140             | 91            | 12,35          | 28            | -15,15         | 204       | 2,00       |
| Prosječna relativna pogreška / % |                |             |                 |               | 9,40           |               | 12,85          |           | 12,73      |



Slika 8.12. Usporedba numeričkih modela u predviđanju izlaznih veličina ortogonalnog rezanja

8. Numerička analiza: procjena točnosti predviđanja sila rezanja i temperature u zoni rezanja za različite ulazne parametre

U skladu s eksperimentalnim ispitivanjima, temperatura u zoni rezanja značajno raste s porastom brzine rezanja. Obzirom da je za sve simulacije predviđena temperatura u zoni rezanja veća od eksperimentalne, u sljedećem koraku će se razmatrati utjecaj koeficijenta prijelaza topline na rezultate numeričkih simulacija. Određen je koeficijent prijelaza topline od  $150 \text{ kW/m}^2\text{K}$ , a ostale numeričke postavke i ulazni parametri su nepromijenjeni. Usvojena je vrijednost smične granice tečenja obratka za koju se za razmatranu brzinu rezanja i posmak ostvarena najbolja predviđanja sila rezanja. U Tablici 8.4. su prikazani rezultati numeričkih simulacija te relativne pogreške za promatrane izlazne veličine ortogonalnog rezanja.

Tablica 8.4. Ulazne veličine te rezultati numeričkih simulacija za modificirani numerički model; koeficijent prijelaza topline  $150 \text{ kW/m}^2\text{K}$

| Redni broj                       | $v_c$<br>m/min | $f$<br>mm/o | $\tau_Y$<br>MPa | $F_c$<br>N/mm | $F_{c,e}$<br>% | $F_f$<br>N/mm | $F_{f,e}$<br>% | $T$<br>°C | $T_e$<br>% |
|----------------------------------|----------------|-------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|-----------|------------|
| 1                                | 93             | 0,05        | 500             | 66            | -1,49          | 37            | -9,76          | 120       | 2,56       |
| 2                                | 233            | 0,05        | 400             | 61            | 10,91          | 28            | -9,68          | 173       | 8,13       |
| 3                                | 373            | 0,05        | 300             | 54            | 10,20          | 21            | -25,00         | 199       | 3,65       |
| 4                                | 93             | 0,08        | 400             | 88            | 6,02           | 48            | 2,13           | 126       | 5,88       |
| 5                                | 233            | 0,08        | 300             | 81            | 14,08          | 32            | -11,11         | 177       | 9,26       |
| 6                                | 373            | 0,08        | 250             | 76            | 16,92          | 28            | -9,68          | 202       | 6,32       |
| 7                                | 93             | 0,11        | 300             | 114           | 0,88           | 63            | 6,78           | 133       | 9,92       |
| 8                                | 233            | 0,11        | 200             | 98            | 11,36          | 40            | -2,44          | 178       | 5,33       |
| 9                                | 373            | 0,11        | 150             | 91            | 12,35          | 27            | -18,18         | 199       | -0,50      |
| Prosječna relativna pogreška / % |                |             |                 |               | 9,36           |               | 10,53          |           | 5,73       |

Temperatura u zoni rezanja je bolje predviđena za sve simulacije te je relativna pogreška manja od 10 %. Zbog toga će se u nastavku rada primijeniti koeficijent prijelaza topline  $150 \text{ kW/m}^2\text{K}$ . Važno je uočiti da iako su prosječne relativne pogreške za komponente sile rezanja oko 10 % ta odstupanja za pojedine kombinacije ulaznih parametara su do 25 % (eksperiment pod rednim brojem tri, posmična sila). Veće pogreške u predviđanju glavne sile rezanja i posmične sile su za slučajeve kada je veća brzina rezanja, odnosno veća brzina deformacije i više temperature. Iako su parametri JC zakona lako dostupni, ovaj zakon ima određene nedostatke. Može se zaključiti da Johnson-Cookov zakon očvršćivanja ne može dobro opisati ponašanje materijala pri povišenim temperaturama. Uzrok tome može biti što u ovom zakonu nije obuhvaćen međusobni utjecaj deformacije, brzine deformacije i temperature. Zbog navedenog je u nastavku rada istražen utjecaj različitih zakona očvršćivanja na rezultate numeričkih simulacija.

## 9. NUMERIČKO PREDVIĐANJE ORTOGONALNOG REZANJA PRIMJENOM IZRAĐENIH MODELA TE RAZLIČITIH ZAKONA OČVRŠĆIVANJA

Obzirom da programski paket za analizu metodom konačnih elemenata ABAQUS/Explicit nema ugrađene sve zakone očvršćivanja, pojedine zakone je potrebno implementirati primjenom potprograma VUHARD. Potprogram se sastoji od napisanih pripadnih kodova koji opisuju očvršćivanje materijala s promjenom deformacije, brzine deformacije te temperature odnosno izraz za ekvivalentno naprežanje. Potprogram treba sadržavati i parcijalne derivacije naprežanja tečenja po ekvivalentnoj plastičnoj deformaciji, brzini ekvivalente plastične deformacije i temperaturi  $(\bar{\varepsilon}_p, \dot{\varepsilon}_p, T)$ . Pripadni kodovi izrađeni su u programskom paketu FORTRAN. Točnost izrađenih kodova je ispitana različitim opterećivanjem jednog konačnog elementa. U prvoj fazi su uspoređeni rezultati simulacija vlačnog testa i smičnog testa primjenom već ugrađenog Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja te primjenom Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja implementiranog preko programskog paketa FORTRAN. Za oba modela su primijenjene iste značajke materijala EN AW 6082 T6 koje su prikazane u Tablici 5.2. i Tablici 7.3. Primjer VUHARD potprograma za JC zakon očvršćivanja prikazan je u Prilogu A. U potprogramu, Johnson-Cookov zakon očvršćivanja je zapisan prema jednadžbi (3.45.) Parcijalne derivacije naprežanja tečenja su također zapisane u potprogramu, a za Johnson-Cookov zakon očvršćivanja glase:

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial \bar{\varepsilon}_p} = [nB\bar{\varepsilon}_p^{n-1}] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_T - T_0} \right)^m \right] \quad (9.1.)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial \bar{\varepsilon}_p} = [A + B\bar{\varepsilon}_p^n] \left[ \frac{c}{\dot{\varepsilon}_p} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_T - T_0} \right)^m \right] \text{ za } \dot{\varepsilon}_p \geq \dot{\varepsilon}_0$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial \dot{\varepsilon}_p} = 0 \text{ za } \dot{\varepsilon}_p \leq \dot{\varepsilon}_0 \quad (9.2.)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial T} = [A + B\bar{\varepsilon}_p^n] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[ \frac{-m}{T - T_0} \left( \frac{T - T_0}{T_T - T_0} \right)^m \right] \text{ za } T \in [T_0, T_T]$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial T} = 0 \text{ za } T \notin [T_0, T_T] \quad (9.3.)$$

### 9.1. Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja

Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja primijenjen za simulaciju postupka obrade ortogonalnog rezanja. Parametri obrade su  $v_c=373$  m/min i  $f = 0,05$  mm/o. Primijenjen je Coulombov model trenja. Ostali ulazni parametri i numeričke postavke su jednaki onima opisanim u poglavlju 8.2. Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja je također implementirani preko programskog paketa FORTRAN, a za aluminijske legure glasi:

$$\sigma_y = C'_0 + C'_2 \bar{\epsilon}_p^{0,5} e^{\left(-C'_3 T + C'_4 T \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0}\right)} \quad (9.4.)$$

Parcijalne derivacije naprezanja tečenja su također zapisane u potprogramu, a za Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja glase:

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial \bar{\epsilon}_p} = 0,5 C'_2 \bar{\epsilon}_p^{-0,5} e^{\left(-C'_3 T + C'_4 T \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0}\right)} \quad (9.5.)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial \dot{\epsilon}_p} = C'_2 \bar{\epsilon}_p^{0,5} e^{\left(-C'_3 T + C'_4 T \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0}\right)} \frac{C'_4 T}{\dot{\epsilon}_p} \quad (9.6.)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial T} = C'_2 \bar{\epsilon}_p^{0,5} e^{\left(-C'_3 T + C'_4 T \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0}\right)} \left(-C'_3 + C'_4 \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0}\right) \quad (9.7.)$$

Vrijednosti parametara Zerilli-Armstrongovog zakona očvršćivanja za leguru EN AW 6082 T6 su preuzete iz literature [159] te su prikazane u Tablici 9.1.

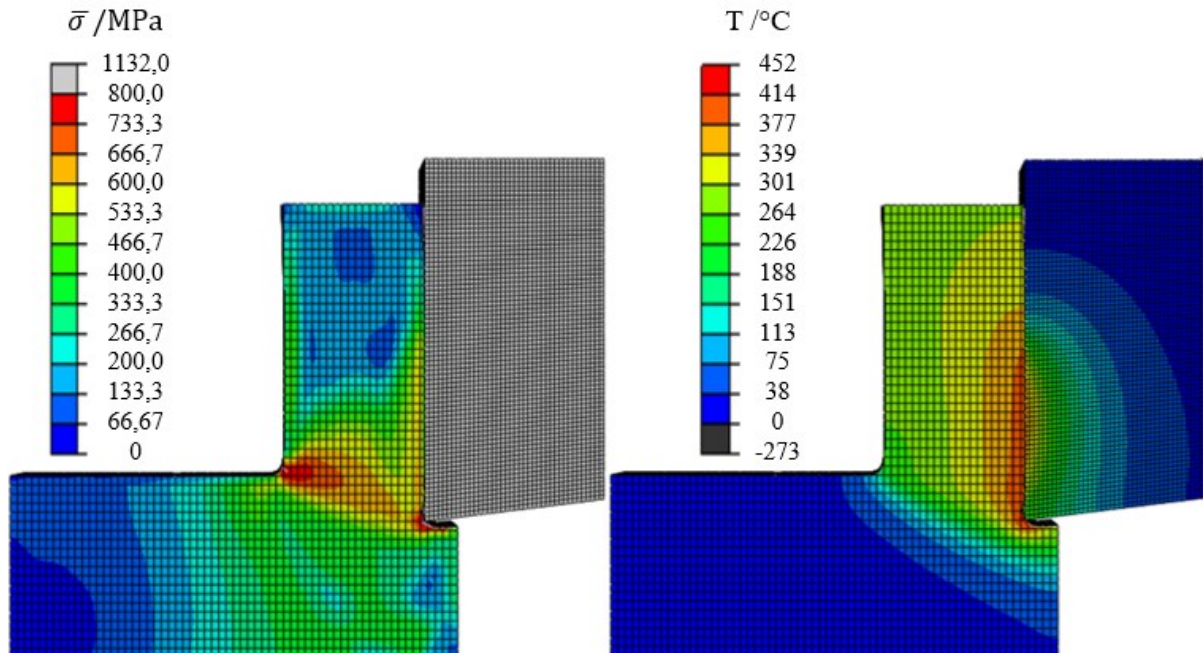
Tablica 9.1. Parametri Zerilli-Armstrongovog zakona očvršćivanja za EN AW 6082 T6 [159]

| $C'_0$ /MPa | $C'_2$ /MPa | $C'_3$ /K <sup>-1</sup> | $C'_4$ /K <sup>-1</sup> | $\dot{\epsilon}_0$ /s <sup>-1</sup> |
|-------------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 0           | 3551,4      | 0,00341                 | 0,000057                | 10 500                              |

Na Slici 9.1. prikazana je raspodjela ekvivalentnog von Mises naprezanja u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja. Predviđena glavna sila rezanja 96 N/mm (relativna pogreška 96 %) te posmična sila 59 N/mm (relativna pogreška 111 %) su značajno veće od eksperimentalnih podataka te od predviđanja primjenom JC zakona očvršćivanja. Također je previđena i značajno veća temperatura u zoni rezanja 309 °C (relativna pogreška 61 %). Uzrok tome je što s odabranim parametrima Zerilli-Armstrongova



zakona očvršćivanja javljaju se veća naprezanja u obratku te se stvara veći otpor prilikom rezanja ovakvog materijala. To uzrokuje povećanje komponenti sile rezanja te povećanje temperature u zoni rezanja.



Slika 9.1. Rezultati dobiveni numeričkim postupkom; raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja za Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja i  $v_c = 373 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,05 \text{ mm/o}$

## 9.2. Izmijenjeni Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja

Nakon što je uočeno da Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja s odabranim parametrima iz literature nije pogodan za predviđanje procesa odvajanja čestica u razmatranje je uzet i izmijenjen Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja [160]. Obzirom da u literaturi nisu pronađene vrijednosti parametara izmijenjenog Zerilli-Armstrongovog zakona očvršćivanja, u nastavku je prikazan postupak određivanja vrijednosti istih na temelju poznatih krivulja očvršćivanja za razmatranu leguru iz literature [151].

Izmijenjeni Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja glasi [160]:

$$\sigma_y = (C_1 + C_2 \bar{\epsilon}_p^{n_z}) e^{\left[ -(C_3 + C_4 \bar{\epsilon}_p)(T - T_0) + (C_5 + C_6(T - T_0)) \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}_p}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right]} \quad (9.8.)$$

gdje su  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, n_z$  parametri izmijenjenog Zerilli-Armstrongovog zakona očvršćivanja.

Za slučaj kada je brzina ekvivalentne plastične deformacije jednaka referentnoj izraz (9.8.) se pojednostavljuje:

$$\sigma_y = (C_1 + C_2 \bar{\epsilon}_p^{n_z}) e^{-(C_3 + C_4 \bar{\epsilon}_p)(T - T_0)} \quad (9.9.)$$

Logaritmiranjem prethodnog izraza slijedi:

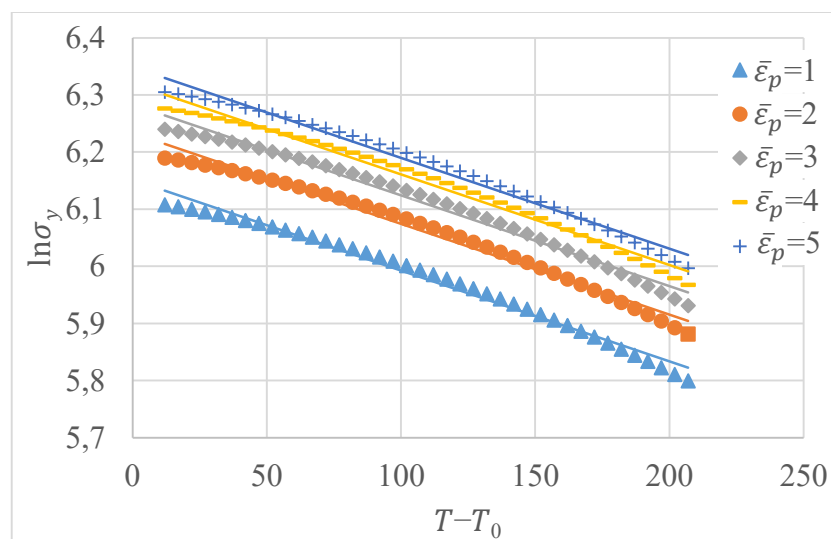
$$\ln \sigma_y = \ln(C_1 + C_2 \bar{\epsilon}_p^{n_z}) - (C_3 + C_4 \bar{\epsilon}_p)(T - T_0) \quad (9.10.)$$

Iz izraza (9.10.) vidljivo je da se vrijednost izraza  $-(C_3 + C_4 \bar{\epsilon}_p)$  može odrediti iz nagiba pravaca ( $S_1$ ) koji predstavljaju ovisnost napreznja ( $\ln \sigma_y$ ) o temperaturi ( $T - T_0$ ) za različite ekvivalentne plastične deformacije (Slika 9.2.):

$$S_1 = -(C_3 + C_4 \bar{\epsilon}_p) \quad (9.11.)$$

Također, vrijednost izraza  $\ln(C_1 + C_2 \bar{\epsilon}_p^{n_z})$  može se odrediti iz odsječaka ( $L_1$ ) na osi  $y$  tih pravaca:

$$L_1 = \ln(C_1 + C_2 \bar{\epsilon}_p^{n_z}) \quad (9.12.)$$



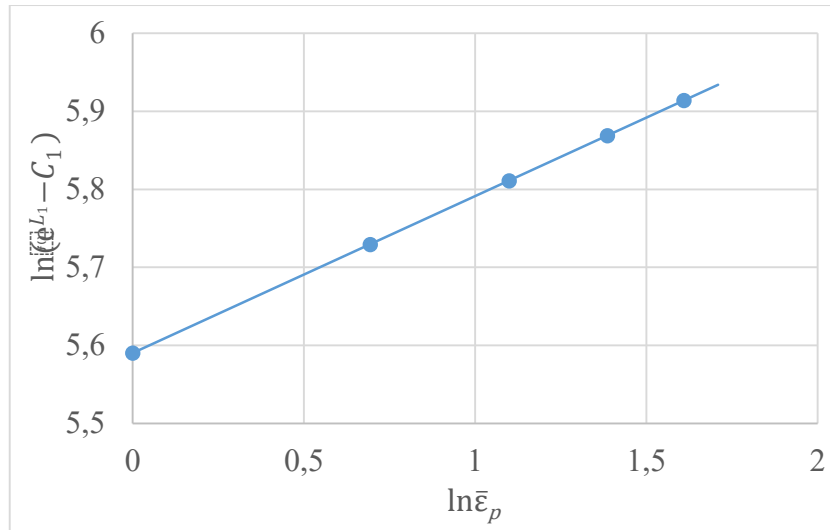
Slika 9.2. Ovisnost  $\ln \sigma$  o  $T - T_0$  za različite ekvivalentne plastične deformacije

Vrijednost parametara  $-C_3$  i  $-C_4$  se može odrediti iz vrijednosti odsjeka odnosno nagiba pravca koji predstavlja ovisnost  $S_1$  o  $\bar{\epsilon}_p$ . Obzirom da su pravci na Slici 9.2. paralelni, parametar  $C_4$  je nula, a  $C_3 = 0,0015875$ .

Nakon potenciranja i ponovnog logaritmiranja izraza (9.12.) slijedi:

$$\ln(e^{L_1} - C_1) = \ln C_2 + n_z \ln \bar{\epsilon}_p \quad (9.13.)$$

Vrijednost parametra  $C_1$  se određuje za referentnu temperaturu i referentnu brzinu ekvivalentne plastične deformacije te je ona jednaka vrijednosti parametra  $A$  u Johnson-Cookovom zakonu očvršćivanja (201,55 MPa). Vrijednosti parametara  $n_z$  i  $C_2$  mogu se odrediti iz nagiba odnosno odsjeka pravca koji predstavlja ovisnost  $\ln(e^{L_1} - C_1)$  o  $\ln \bar{\epsilon}_p$ , Slika 9.3. Izračunate vrijednosti su  $n_z = 0,201$  te  $C_2 = 267,79$  MPa.



Slika 9.3. Ovisnost  $\ln(e^{L_1} - C_1)$  o  $\ln \bar{\epsilon}_p$

Logaritmiranjem izraza (9.9.) slijedi:

$$\ln \sigma_y = \ln(C_1 + C_2 \bar{\epsilon}_p^{n_z}) - (C_3 + C_4 \bar{\epsilon}_p)(T - T_0) + (C_5 + C_6(T - T_0)) \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}_p}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \quad (9.14.)$$

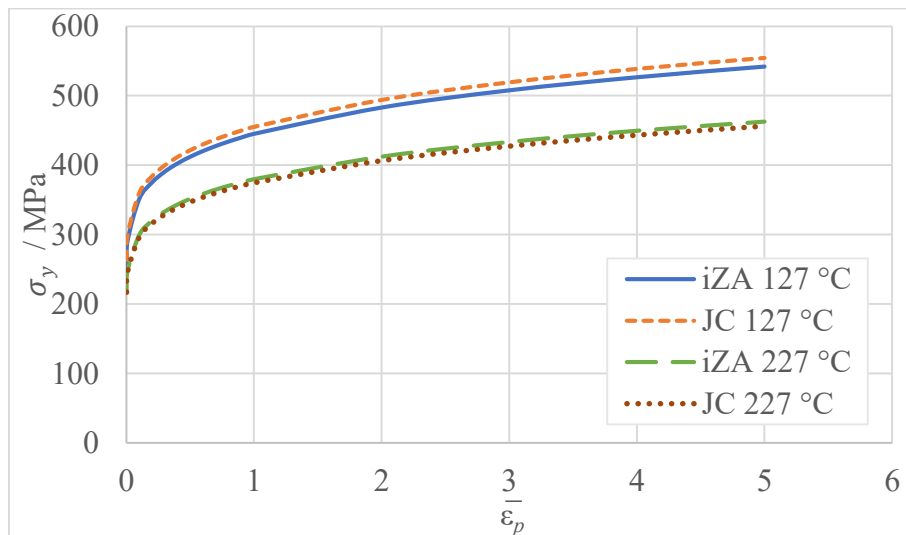
Iz nagiba pravaca ( $S_2$ ) koji predstavljaju ovisnost  $\ln \sigma_y$  o  $\ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}_p}{\dot{\bar{\epsilon}}_0}$  za različite temperature i deformacije, može se odrediti vrijednost izraza  $(C_5 + C_6(T - T_0))$ . Zatim, vrijednosti parametara  $C_5$  i  $C_6$  mogu se odrediti iz odsječaka odnosno nagiba pravaca koji predstavljaju ovisnost  $S_2$  o  $T - T_0$ . Određena je vrijednost parametara  $C_6 = 0$  (pravci su paralelni) te

$C_5 = 0,00848$ . Vrijednosti parametara izmijenjenog Zerilli-Armstrongovog zakona očvršćivanja za EN AW 6082 T6 su prikazane u Tablici 9.2.

Tablica 9.2. Parametri izmijenjenog Zerilli-Armstrongovog zakona očvršćivanja za EN AW 6082 T6

| $C_1$ /MPa | $C_2$ /MPa | $C_3$   | $C_4$ | $C_5$   | $C_6$ | $n_z$ | $\dot{\epsilon}_0/s^{-1}$ |
|------------|------------|---------|-------|---------|-------|-------|---------------------------|
| 201,55     | 267,79     | 0,00159 | 0     | 0,00848 | 0     | 0,201 | 0,001                     |

Usporedba krivulja Johnson-Cookovog (JC) zakona očvršćivanja i krivulja izmijenjenog Zerilli-Armstrongovog (iZA) zakona očvršćivanja za razmatranu vrijednost  $\dot{\epsilon}_p = 1000 \text{ s}^{-1}$  je prikazana na Slici 9.4.



Slika 9.4. Ovisnost naprežanja tečenja o ekvivalentnoj plastičnoj deformaciji za različite zakone očvršćivanja pri razmatranj vrijednosti  $\dot{\epsilon}_p = 1000 \text{ s}^{-1}$

U potprogram su zapisani izmijenjeni Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja te parcijalne derivacije navedenog zakona koje glase:

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial \bar{\epsilon}_p} = (n_z C_2 \bar{\epsilon}_p^{n_z - 1}) e^{\left[ -(C_3 + C_4 \bar{\epsilon}_p)(T - T_0) + (C_5 + C_6(T - T_0)) \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right]} - C_4(T - T_0) \quad (9.15.)$$

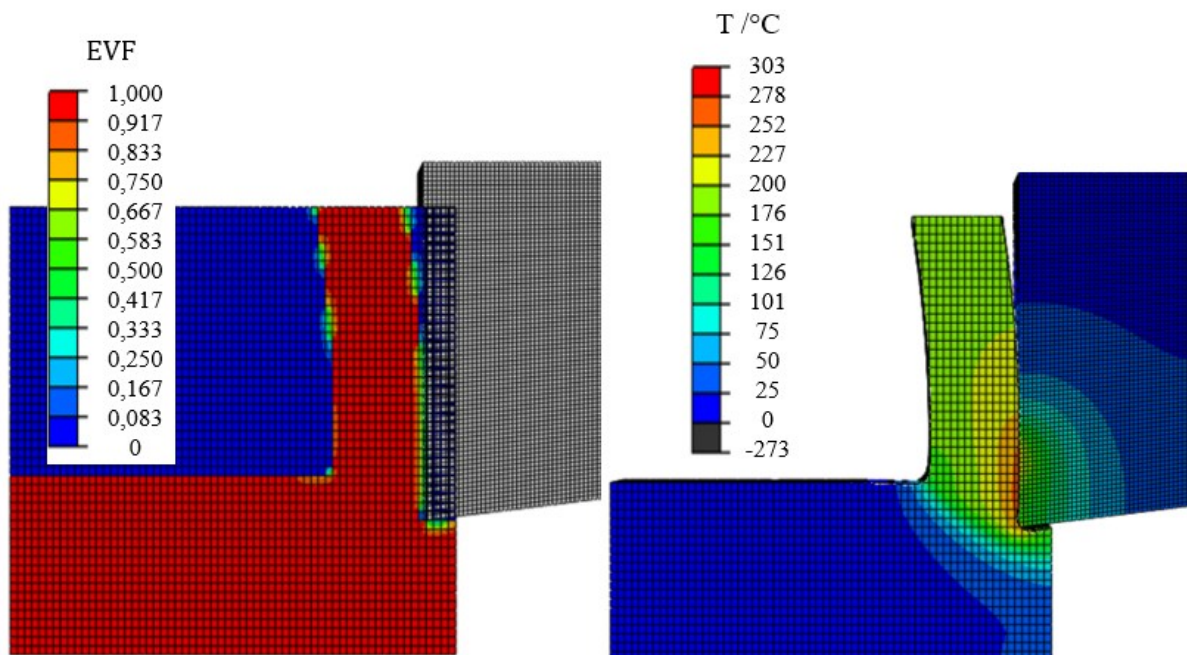
$$(C_2 \bar{\epsilon}_p^{n_z} + C_1) e^{\left[ -(C_3 + C_4 \bar{\epsilon}_p)(T - T_0) + (C_5 + C_6(T - T_0)) \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right]}$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}_p} = \left\{ (C_5 + C_6(T - T_0))(C_2 \bar{\epsilon}_p^{n_z} + C_1) e^{\left[ -(C_3 + C_4 \bar{\epsilon}_p)(T - T_0) + (C_5 + C_6(T - T_0)) \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}_p}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right]} \right\} / \dot{\bar{\epsilon}}_p \quad (9.16.)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial T} = \left[ C_6 \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}_p}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} - (C_3 + C_4 \bar{\epsilon}_p) \right] (C_2 \bar{\epsilon}_p^{n_z} + C_1) e^{\left[ -(C_3 + C_4 \bar{\epsilon}_p)(T - T_0) + (C_5 + C_6(T - T_0)) \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}_p}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right]} \quad (9.17.)$$

Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja primijenjen je za simulaciju ortogonalnog rezanja. Parametri obrade su  $v_c = 373$  m/min i  $f = 0,05$  mm/o. Primijenjen je Coulombov model trenja. Ostali ulazni parametri i numeričke postavke su jednaki onima opisanim u poglavlju 8.2.

Na Slici 9.5. prikazan je izgled odvojene čestice te raspodjela temperature u zoni rezanja za  $v_c = 373$  m/min,  $f = 0,05$  mm/o i izmijenjeni Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja. Predviđena debljina odvojene čestice je manja od 0,1 mm što je znatno manje od eksperimentalnih mjerenja (0,163 mm). Prosječna temperatura u odvojenoj čestici je 202 °C (relativna pogreška 4,95 %). Predviđena je glavna sila rezanja s relativnim odstupanjem -2,04 % (48 N/mm). S druge strane, posmična sila je lošije predviđena te je relativno odstupanje -14,29 %. Primjenom izmijenjenog Zerilli-Armstrongovog zakona očvršćivanja dobiva se manja debljina odvojene čestice što znači da je manji otpor prilikom rezanja. To uzrokuje smanjenje komponenti sile rezanja. Primijenjeni zakon očvršćivanja obuhvatio je omekšavanje materijala pri povišenim temperaturama. Obzirom da su za ovu kombinaciju parametara obrade odstupanja u predviđanju posmične sile veća od prihvatljivih (do cca. 10 %), ostale kombinacije parametara obrade nisu razmatrane.



Slika 9.5. Rezultati dobiveni numeričkim postupkom; raspodjela Eulerovog volumnog udjela materijala te raspodjela temperature u zoni rezanja za izmijenjeni Zerilli-Armstrongov zakon očvršćivanja i  $v_c=373$  m/min,  $f = 0,05$  mm/o

### 9.3. Prijedlog zakona očvršćivanja temeljenog na Johnson-Cookovom zakonu očvršćivanja i Arrheniusovoj jednadžbi

Obzirom da najčešće korišteni zakoni očvršćivanja (JC i ZA) nisu u potpunosti prikladni za opis ponašanja aluminijske legure tijekom ortogonalnog rezanja potrebno je proučiti zakone očvršćivanja koji bi mogli objasniti dodatno omekšavanje te obuhvatiti međusobni utjecaj temperature i brzine deformacije. Zakon očvršćivanja temeljen na Arrheniusovoj jednadžbi opisuje ponašanje materijala za različite temperature i brzine deformacije. Model uključuje Zener-Hollomonov parametar koji opisuje utjecaj temperature i brzine deformacije na ponašanje materijala [20]:

$$Z = \dot{\epsilon}_p \frac{Q}{R^*T} \quad (9.18.)$$

Brzina ekvivalentne plastične deformacije se može zapisati:

$$\dot{\epsilon}_p = A' F(\sigma_y) e^{-\frac{Q}{R^*T}} \quad (9.19.)$$

gdje je:

$$F(\sigma_y) = [\sinh(\alpha\bar{\sigma})]^{n_a} \quad (9.20.)$$

Iz jednadžbi (9.18.) i (9.20.) proizlazi:

$$\sigma_y = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{1/n_a} + \left[ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{2/n_a} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (9.21.)$$

Za mala vrijednosti naprezanja ( $\alpha\sigma_y < 0,8$ ) iz jednadžbi (9.19.) i (9.20.) slijedi izraz:

$$\dot{\epsilon}_p = A_1 \sigma_y^{n_1} \quad (9.22.)$$

dok za velike vrijednosti naprezanja ( $\alpha\sigma_y > 1,2$ ) iz jednadžbi (9.19.) i (9.20.) slijedi izraz:

$$\dot{\epsilon}_p = A_2 e^{\beta\sigma_y} \quad (9.23.)$$

gdje su  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $n_1$  i  $\beta$  parametri Arrheniusovog zakona očvršćivanja.

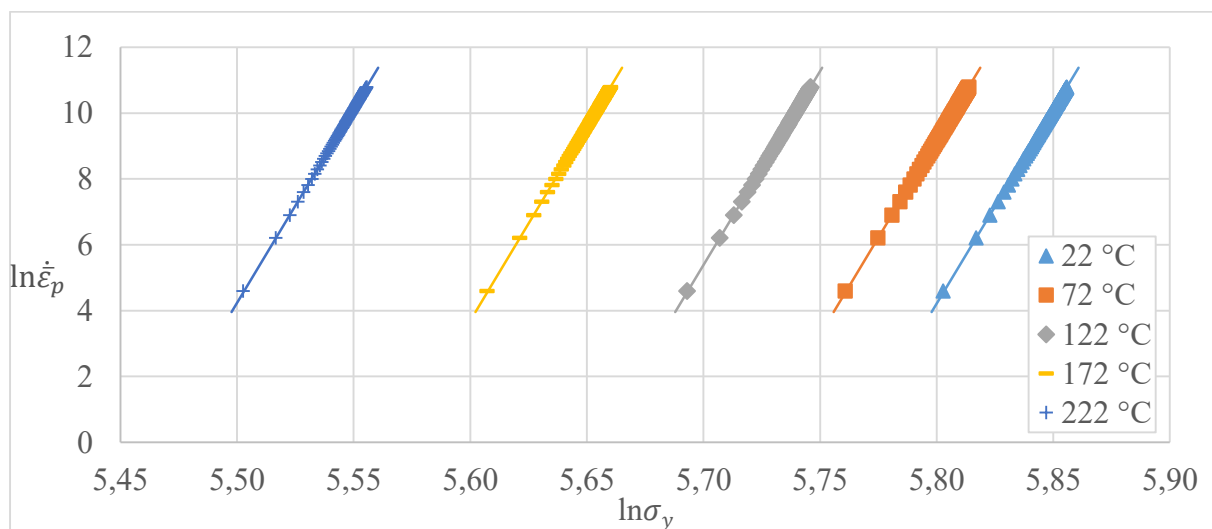
U nastavku je prikazan postupak određivanja vrijednosti parametara na temelju poznatih krivulja očvršćivanja za razmatranu leguru iz literature [151].

Logaritmiranjem izraza (9.22.) i (9.23.) slijedi:

$$\ln \dot{\epsilon}_p = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma_y \quad (9.24.)$$

$$\ln \dot{\epsilon}_p = \ln A_2 + \beta \sigma_y \quad (9.25.)$$

Iz jednadžbe (9.24.) vidljivo je da se vrijednost parametra  $n_1$  može odrediti iz nagiba pravaca koji predstavljaju ovisnost  $\ln \dot{\epsilon}_p$  o  $\ln \sigma_y$  za različite temperature, Slika 9.6.

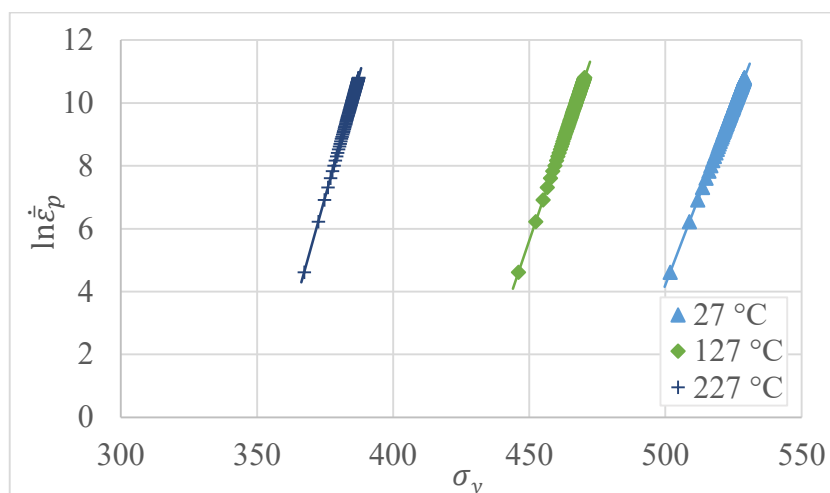


Slika 9.6. Ovisnost  $\ln \dot{\epsilon}_p$  o  $\ln \sigma_y$  za različite temperature i razmatranu vrijednost  $\bar{\epsilon}_p = 0,01$

Odabrana ekvivalentna plastična deformacija je konstantna te iznosi 0,01. Može se uočiti da su pravci približno paralelni te da temperatura nema utjecaj na vrijednost parametra  $n_1$ .

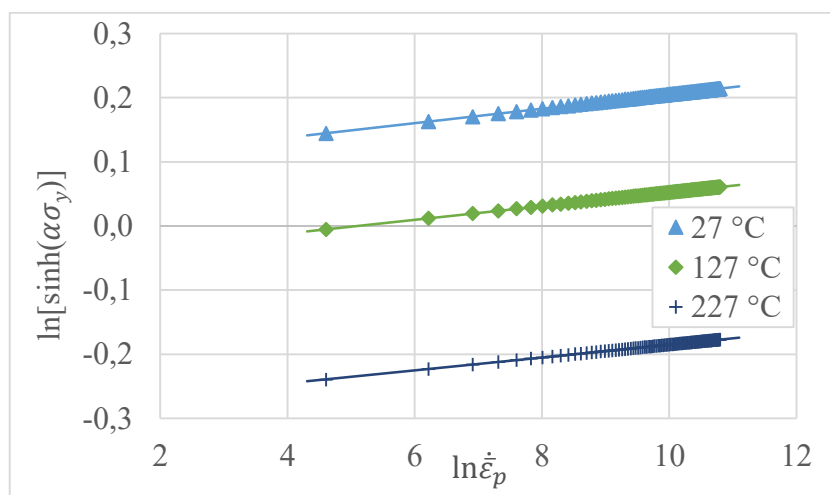
Vrijednost parametra  $\beta$  može se odrediti iz nagiba pravaca koji predstavljaju ovisnost  $\ln \dot{\bar{\epsilon}}_p$  o  $\sigma_y$  za različite temperature i različite ekvivalentne plastične deformacije, jednadžba (9.25.).

Odabrane su tri različite temperature te pet razina deformacije što čini ukupno 15 pravaca. Na Slici 9.7. prikazana je ovisnost  $\ln \dot{\bar{\epsilon}}_p$  o  $\sigma_y$  za konstantnu ekvivalentnu plastičnu deformaciju koja iznosi jedan.



Slika 9.7. Ovisnost  $\ln \dot{\bar{\epsilon}}_p$  o  $\sigma_y$  za različite temperature i razmatranu vrijednost  $\bar{\epsilon}_p = 1$

Ovisnost  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_y)]$  o  $\ln \dot{\bar{\epsilon}}_p$  je prikazana na Slici 9.8. za različite temperature i za konstantnu ekvivalentnu plastičnu deformaciju koja iznosi jedan.



Slika 9.8. Ovisnost  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_y)]$  o  $\ln \dot{\bar{\epsilon}}_p$  za različite temperature i vrijednost  $\bar{\epsilon}_p = 1$



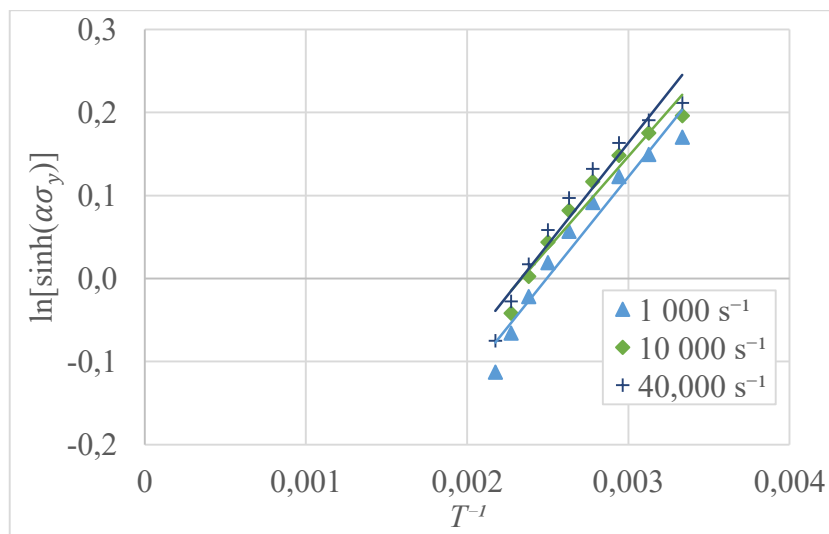
Vrijednost  $1/n_a$  je određena kao srednja vrijednost nagiba 15 pravaca (pet različitih razina deformacije i tri temperature). Izračunata vrijednost za parametar  $n_a$  je 89,28.

Izračunata vrijednost za parametar  $n_1$  je 117,92 i za parametar  $\beta$  je 0,232 MPa<sup>-1</sup>. Obzirom da se parametar  $\alpha$  određuje kao omjer  $\beta$  i  $n_1$  njegova vrijednost je 0,001967 MPa<sup>-1</sup>.

Za sve razine naprezanja, logaritmiranjem izraza (9.19.) slijedi:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma_y)] = \frac{\ln\dot{\bar{\epsilon}}_p}{n_a} + \frac{Q}{n_a R T} - \frac{\ln A'}{n_a} \quad (9.26.)$$

Vrijednost  $\frac{Q}{n_a R}$  može se odrediti iz nagiba pravaca koji predstavljaju ovisnost  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_y)]$  o  $T^{-1}$  za različite ekvivalentne plastične deformacije i različite brzine ekvivalentne plastične deformacije, jednadžba (9.26.) Odabrane su tri različite brzine ekvivalentne plastične deformacije te pet razina ekvivalentnih plastičnih deformacija što čini ukupno 15 pravaca. Iz poznatog omjera određena je vrijednost energije aktivacije  $Q = 162\,595$  J/mol. Na Slici 9.9. prikazana je ovisnost  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_y)]$  o  $T^{-1}$  za konstantnu ekvivalentnu plastičnu deformaciju koja iznosi jedan.

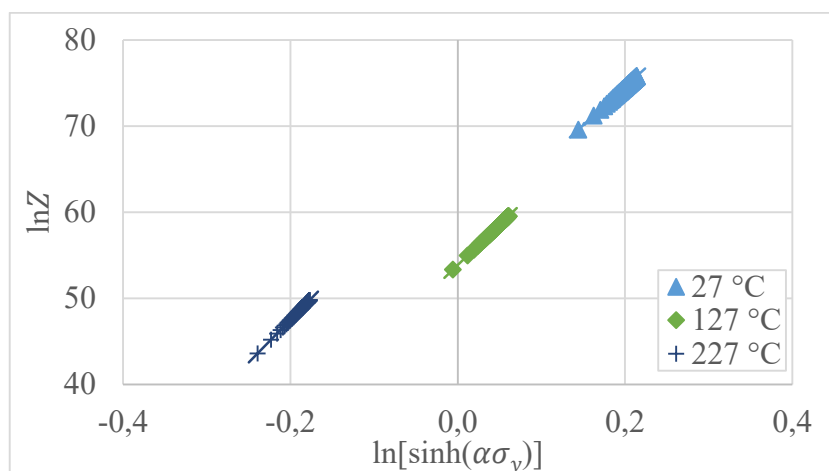


Slika 9.9. Ovisnost  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_y)]$  o  $T^{-1}$  za različite brzine ekvivalentne plastične deformacije i razmatranu vrijednost  $\bar{\epsilon}_p = 1$

Uvrštavanjem izraza 2.4 u 2.6 i logaritmiranjem dobivenog izraza slijedi:

$$\ln Z = \ln A' + n_a \ln[\sinh(\alpha\sigma_y)] \quad (9.27.)$$

Vrijednost  $\ln A$  može se odrediti iz odsječaka na osi  $y$  pravaca koji predstavljaju ovisnost  $\ln Z$  o  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_y)]$  za različite brzine ekvivalentne plastične deformacije i temperature, Slika 9.10. Izračunata vrijednost parametra  $A'$  je  $7,09 \cdot 10^{20} \text{ s}^{-1}$ .



Slika 9.10. Ovisnost  $\ln Z$  o  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_y)]$  za različite temperature i razmatranu vrijednost  $\dot{\epsilon}_p = 100 \text{ s}^{-1}$

Vrijednosti parametara zakona očvršćivanja temeljenog na Arrheniusovoj jednadžbi za EN AW 6082 T6 su prikazane u Tablici 9.3.

Tablica 9.3. Parametri zakona očvršćivanja temeljenog na Arrheniusovoj jednadžbi za

EN AW 6082 T6

| $\alpha / \text{Mpa}^{-1}$ | $Q / \text{J/mol}$ | $A' / \text{s}^{-1}$ | $n_a$ |
|----------------------------|--------------------|----------------------|-------|
| 0,001967                   | 162 595            | $7,09 \cdot 10^{20}$ | 89,28 |

Radi usporedbe u Tablici 9.4. prikazane su izračunate vrijednosti energije aktivacije za leguru EN AW 6082 u različitim stanjima.

Tablica 9.4. Vrijednosti energije aktivacije za promatranu leguru

| literatura | EN AW 6082            | $Q / \text{kJ/mol}$ |
|------------|-----------------------|---------------------|
| [161]      | Homogenizirano stanje | 182                 |
| [162]      | T6                    | 224                 |
| [163]      | Homogenizirano stanje | 99-102              |
| [163]      | Lijeivano stanje      | 200-216             |
| [164]      | Homogenizirano stanje | 191                 |
| [21]       | T6                    | 226                 |
| [165]      | T6                    | 254                 |

Obzirom da zakon očvršćivanja temeljen na Arrheniusovoj jednadžbi ne uzima u obzir utjecaj deformacije na naprezanje potrebno ga je izmijeniti. Cilj je dobiti zakon očvršćivanja koji će vjerodostojno opisati utjecaj deformacije, brzine deformacije te temperature na granicu tečenja aluminijske legure EN AW 6082 T6. Na temelju dosadašnjih istraživanja i dobivenih saznanja odlučeno je implementirati utjecaj deformacije kako je opisan Johnson-Cookovim zakonom očvršćivanja. Utjecaj temperature će se dodatno opisati logaritamskom funkcijom. Zakon očvršćivanja postavljen na temelju izraza za Johnson-Cookov zakon očvršćivanja te Arrheniusovog zakona (JCA zakon) glasi:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}_p^n) \left( 1 + \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{1/n_a} + \left[ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{2/n_a} + 1 \right]^{1/2} \right\} \right) L \left( 1 - \left( \ln \frac{T}{T_0} \right)^d \right) \quad (9.28.)$$

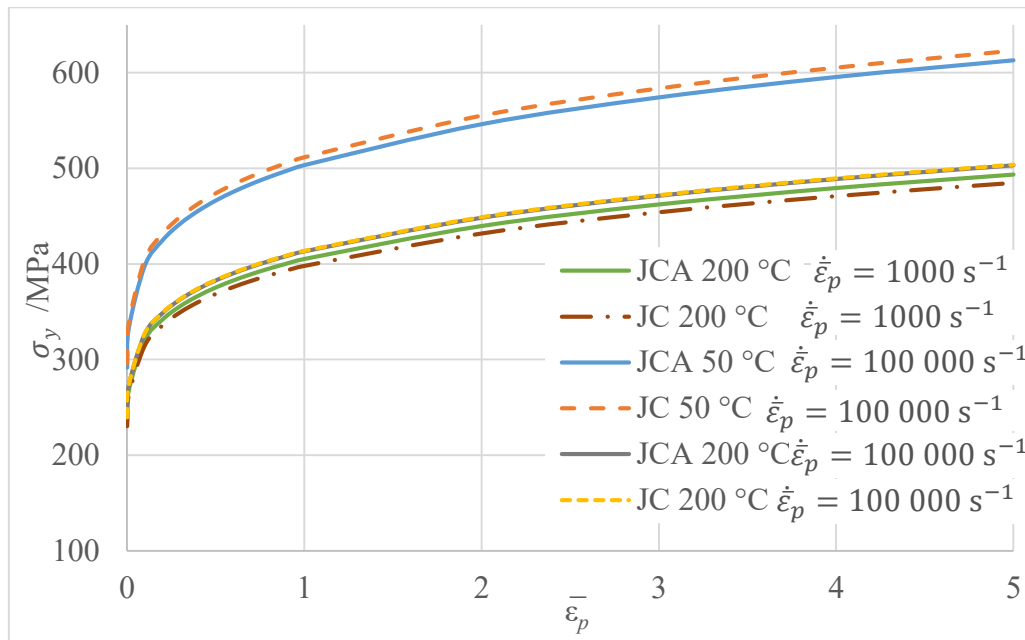
gdje su  $A, B, n$  parametri Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja,  $Q, A', n_a$  parametri zakona očvršćivanja temeljenog na Arrheniusovoj jednadžbi te  $L, d$  parametri prilagodbe. Parametri prilagodbe su uvedeni kako bi naprezanje tečenja pri različitim plastičnim deformacijama, brzinama plastičnih deformacija te temperaturama za Johnson-Cook-Arrheniusov (JCA) zakon očvršćivanja što bolje odgovaralo naprezanju tečenja za prethodno usvojeni JC zakon očvršćivanja. Parametri prilagodbe su određeni korištenjem funkcije *lsqnonlin* u programskom paketu MATLAB.

Vrijednosti parametara JCA zakona očvršćivanja za EN AW 6082 T6 su prikazane u Tablici 9.5.

Tablica 9.5. Parametri JCA zakona očvršćivanja za EN AW 6082 T6

| $A/ \text{MPa}$ | $B/ \text{MPa}$ | $n$   | $Q/ \text{J/mol}$ | $A'/ \text{s}^{-1}$  | $n_a$ | $L$   | $d$ |
|-----------------|-----------------|-------|-------------------|----------------------|-------|-------|-----|
| 201,55          | 250,87          | 0,206 | 162 595           | $7,09 \cdot 10^{20}$ | 89,28 | 0,545 | 2,8 |

Usporedba krivulja Johnson-Cookovog (JC) zakona očvršćivanja i krivulja Johnson-Cook-Arrheniusovog zakona očvršćivanja za razmatranu vrijednost  $\dot{\epsilon}_p = 1000 \text{ s}^{-1}$  i  $\dot{\epsilon}_p = 100\,000 \text{ s}^{-1}$  je prikazana na Slici 9.11. Pri nižim temperaturama i višim brzinama deformacije, JCA zakon očvršćivanja pretpostavlja manje naprezanje tečenja u odnosu na JC zakon očvršćivanja. Pri višim temperaturama i manjim brzinama deformacije JCA zakon očvršćivanja pretpostavlja veće naprezanje tečenja u odnosu na JC zakon očvršćivanja te je ta razlika do 10 MPa.



Slika 9.11. Ovisnost naprezanja tečenja o ekvivalentnoj plastičnoj deformaciji za različite zakone očvršćivanja pri razmatranoj vrijednost  $\dot{\varepsilon}_p = 1000 \text{ s}^{-1}$  i  $\dot{\varepsilon}_p = 100\,000 \text{ s}^{-1}$

Parcijalne derivacije JCA zakona očvršćivanja glase:

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial \bar{\varepsilon}_p} = B \ln \left( 1 - \left( \ln \frac{T}{T_0} \right)^d \right) \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{1/n_a} + \left[ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{2/n_a} + 1 \right]^{1/2} \right\} \bar{\varepsilon}_p^{n-1} \quad (9.29.)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial \dot{\varepsilon}_p} = - \frac{(A + B \bar{\varepsilon}_p^n) L \left( \left( \ln \frac{T}{T_0} \right)^d - 1 \right) \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{1}{n_a}}}{n_a \dot{\varepsilon}_p \left[ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{2}{n_a}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (9.30.)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial T} = \frac{Q(A + B \bar{\varepsilon}_p^n) L \left( \left( \ln \frac{T}{T_0} \right)^d - 1 \right) \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{1}{n_a}}}{R n_a T^2 \left[ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{2}{n_a}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (9.31.)$$

$$\frac{(A + B \bar{\varepsilon}_p^n) L d \left( \ln \frac{T}{T_0} \right)^{d-1} \left( \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{1/n_a} + \left[ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{2/n_a} + 1 \right]^{1/2} \right\} + 1 \right)}{T}$$

#### 9.4. Numerička analiza: procjena točnosti predviđanja sila rezanja i temperature u zoni rezanja za različite ulazne parametre primjenom zakona očvršćivanja temeljenog na Johnson-Cookovom zakonu očvršćivanja i Arrheniusovoj jednadžbi

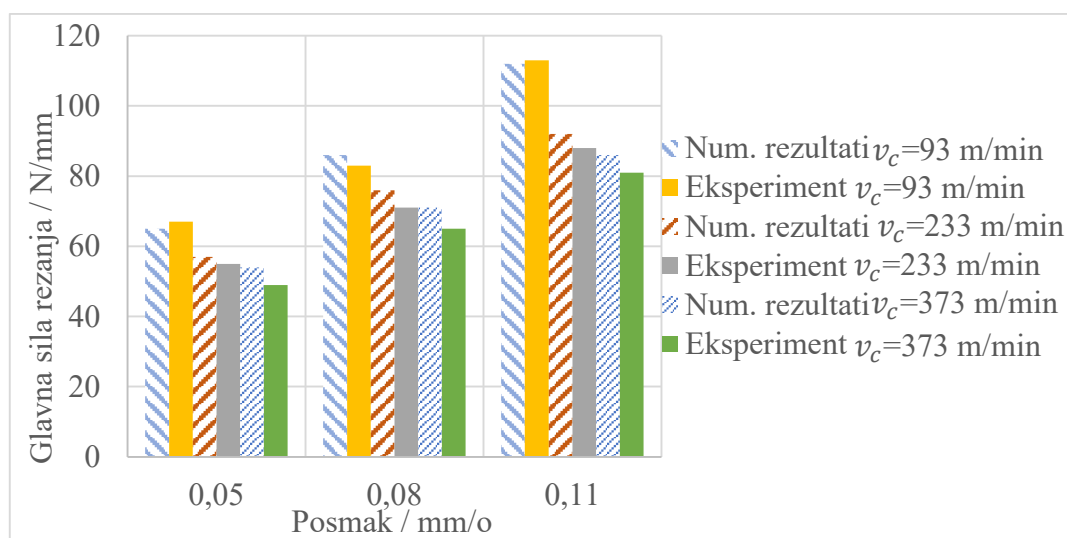
JCA zakon očvršćivanja te njegove parcijalne derivacije su zapisane u programski paket FORTRAN kako bi se simulirao postupak ortogonalnog rezanja. Ulazni parametri i numeričke postavke su jednake onima opisanim u poglavlju 8.2. Za opis ponašanja materijala obratka primijenjen je JCA zakona očvršćivanja. Vrijednosti parametara ovog zakona očvršćivanja su prikazane u Tablici 9.5. Obzirom da je primijenjen Zorevljev model trenja, usvojena je vrijednost smične granice tečenja obratka za koju je za razmatranu brzinu rezanja i posmak ostvarena najbolja predviđanja sila rezanja, Tablica 9.6. Uočeno je da za najmanji razmatrani posmak najbolja predviđanja su se dobila za Coulombov model trenja pa u Tablici 9.6. nisu navedene vrijednosti smične granice tečenja. Koeficijent prijelaza topline između obratka i okoline te alata i okoline je  $150 \text{ kW/m}^2\text{K}$ . Rezultati komponenti sile rezanja i temperature odvojene čestice za definirani plan eksperimenata prikazani su u Tablici 9.6. U Tablici 9.6. su također prikazane relativne pogreške za promatrane izlazne veličine ortogonalnog rezanja ( $F_{c,e}$ ,  $F_{f,e}$ ,  $T_e$ ).

Tablica 9.6. Ulazne veličine te rezultati numeričkih simulacija primjenom JCA zakona očvršćivanja; koeficijent prijelaza topline  $150 \text{ kW/m}^2\text{K}$

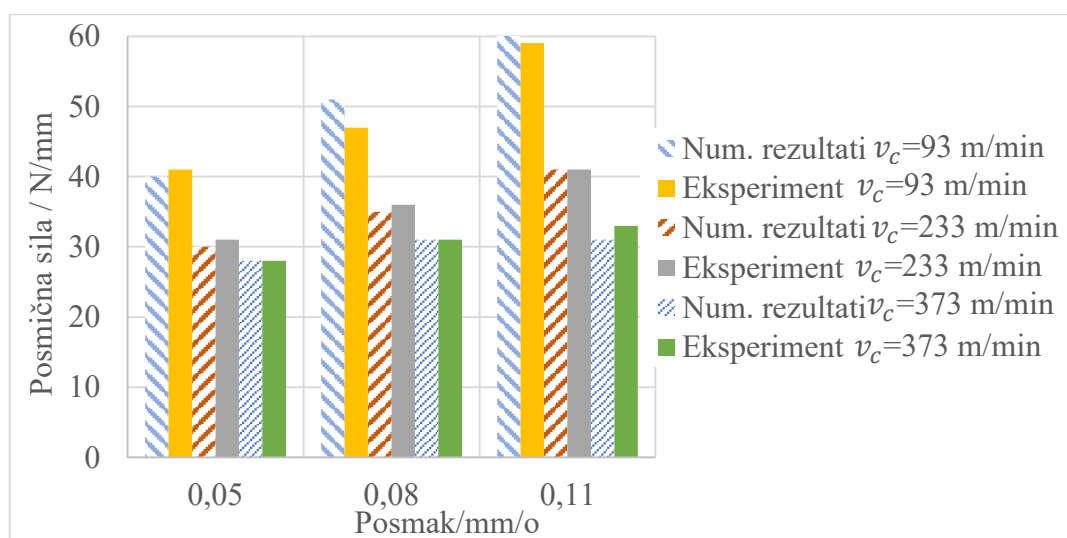
| Redni broj                       | $v_c$<br>m/min | $f$<br>mm/o | $\tau_Y$<br>MPa | $F_c$<br>N/mm | $F_{c,e}$<br>% | $F_f$<br>N/mm | $F_{f,e}$<br>% | $T$<br>°C | $T_e$<br>% |
|----------------------------------|----------------|-------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|-----------|------------|
| 1                                | 93             | 0,05        | /               | 65            | -2,99          | 40            | -2,44          | 117       | 0,00       |
| 2                                | 233            | 0,05        | /               | 57            | 3,64           | 30            | -3,23          | 168       | 5,00       |
| 3                                | 373            | 0,05        | /               | 54            | 10,20          | 28            | 0,00           | 194       | 1,04       |
| 4                                | 93             | 0,08        | 300             | 86            | 3,61           | 51            | 8,51           | 123       | 3,36       |
| 5                                | 233            | 0,08        | 200             | 76            | 7,04           | 35            | -2,78          | 167       | 3,09       |
| 6                                | 373            | 0,08        | 150             | 71            | 9,23           | 31            | 0,00           | 190       | 0,00       |
| 7                                | 93             | 0,11        | 400             | 112           | -0,88          | 65            | 10,17          | 133       | 9,92       |
| 8                                | 233            | 0,11        | 300             | 92            | 4,55           | 41            | 0,00           | 170       | 0,59       |
| 9                                | 373            | 0,11        | 250             | 86            | 6,17           | 31            | -6,06          | 186       | -7,00      |
| Prosječna relativna pogreška / % |                |             |                 |               | 5,37           |               | 3,69           |           | 3,33       |

Rezultati numeričkih simulacija su uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima za sve kombinacije razmatranih parametara obrade. Usporedba glavnih sila rezanja za ortogonalno

rezanje dobivenih numeričkim postupkom i eksperimentalnim ispitivanjima je prikazana na Slici 9.12. Usporedba posmičnih sila za ortogonalno rezanje koje su dobivene numeričkom analizom i eksperimentalnim ispitivanjima je prikazana na Slici 9.13. Glavna sila rezanja te posmična sila su dobro predviđene za sve kombinacije ulaznih parametara te je relativna pogreška unutar 10 %. JCA zakon očvršćivanja značajno bolje predviđa sile rezanja što ukazuje da pouzdano obuhvaća omekšavanje materijala uslijed povećanja temperature kod većih brzina deformacija. Također je dobro obuhvatio i očvršćivanje materijala uslijed povećanja plastičnih deformacija.

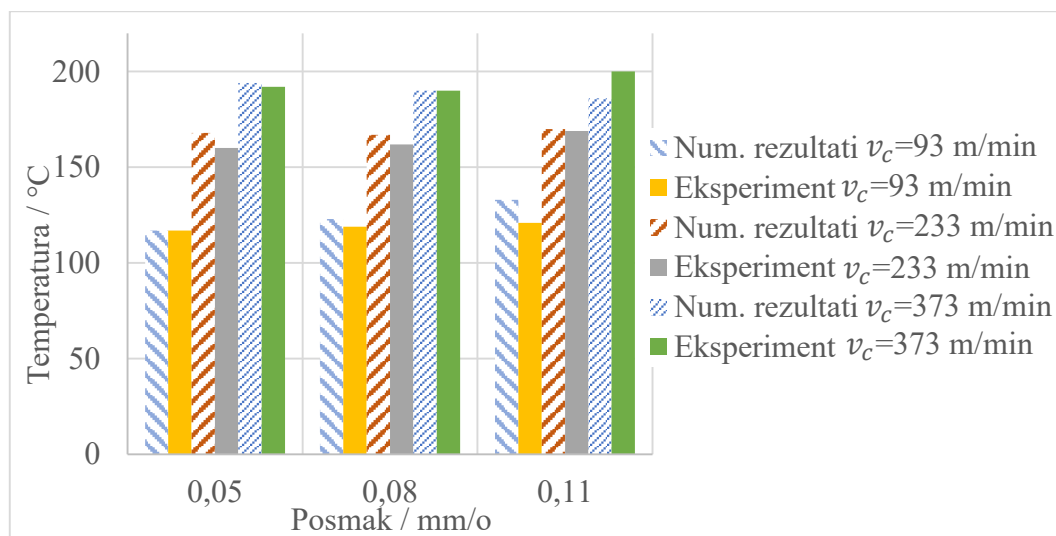


Slika 9.12. Usporedba vrijednosti glavne sile predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti



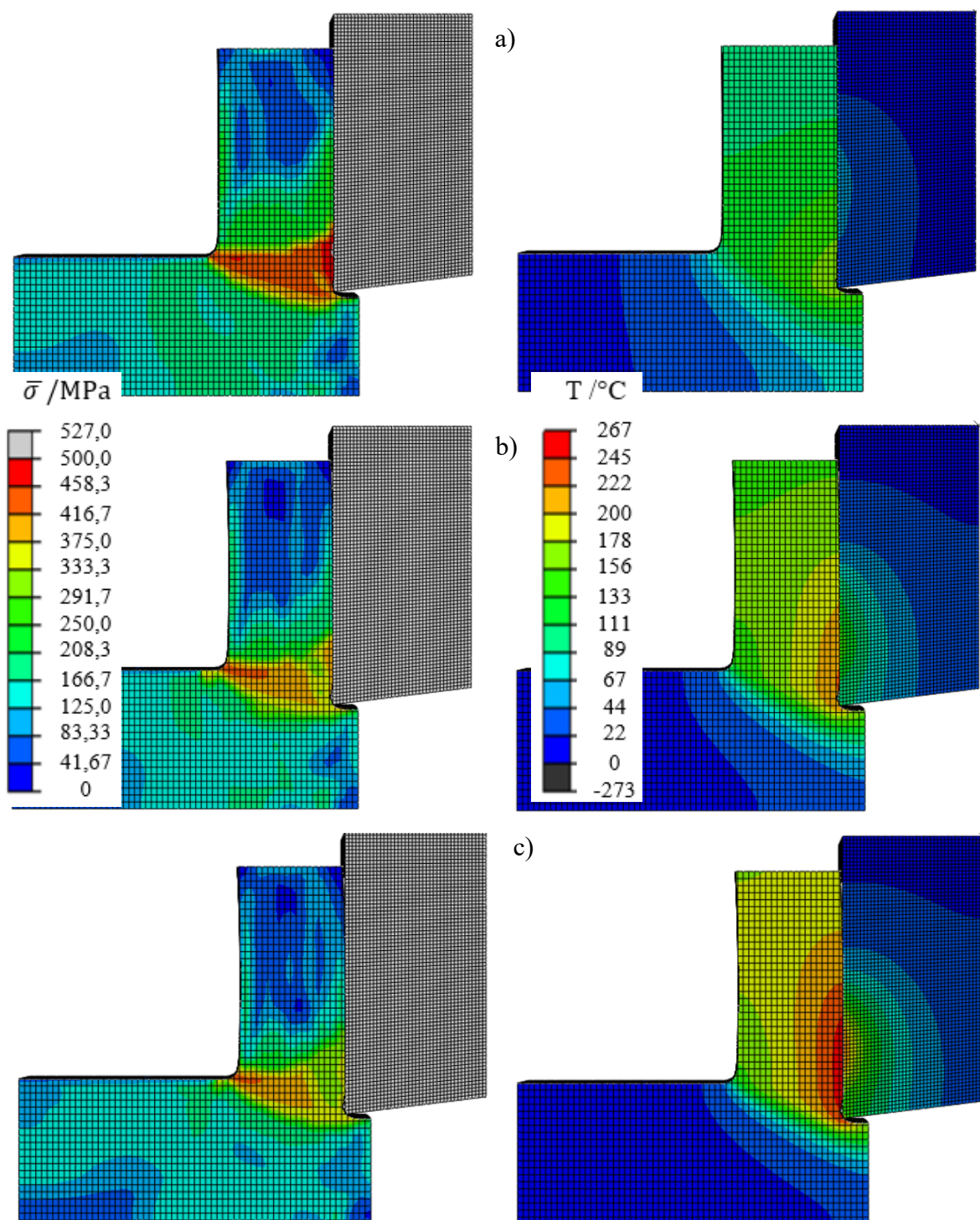
Slika 9.13. Usporedba vrijednosti posmične sile predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti

Usporedba temperature u zoni rezanja dobivene numeričkom analizom i eksperimentalnim ispitivanjima je prikazana na Slici 9.14. Primjenom JCA zakona očvršćivanja utjecaj porasta temperature dovoljan je za smanjenje glavne sile rezanja. Temperatura u zoni rezanja je dobro predviđena za sve kombinacije ulaznih parametara te je relativna pogreška unutar 10 %.



Slika 9.14. Usporedba vrijednosti temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti

U Prilogu B prikazane su vrijednosti glavne sile rezanja, posmične sile te temperature u vremenu predviđene numeričkim modeliranjem gdje je primijenjen JCA zakon očvršćivanja. Vrijeme potrebno da se uspostavi ravnotežno toplinsko stanje je kraće za veće brzine rezanja. Na Slici 9.15., Slici 9.16. i Slici 9.17. prikazana je raspodjela ekvivalentnog von Mises naprezanja u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja za sve simulacije gdje je primijenjen JCA zakon očvršćivanja. Veće ekvivalentno naprezanje se javlja kod manjih brzina rezanja što ujedno rezultira i većim silama rezanja. Veće brzine rezanja uzrokuju veće temperature u odvojenoj čestici. Zbog toga se mogu uočiti i veće temperature na prednjoj površini alata. U razmatranom vremenu trajanja simulacije nije postignuto toplinsko ravnotežno stanje u alatu.



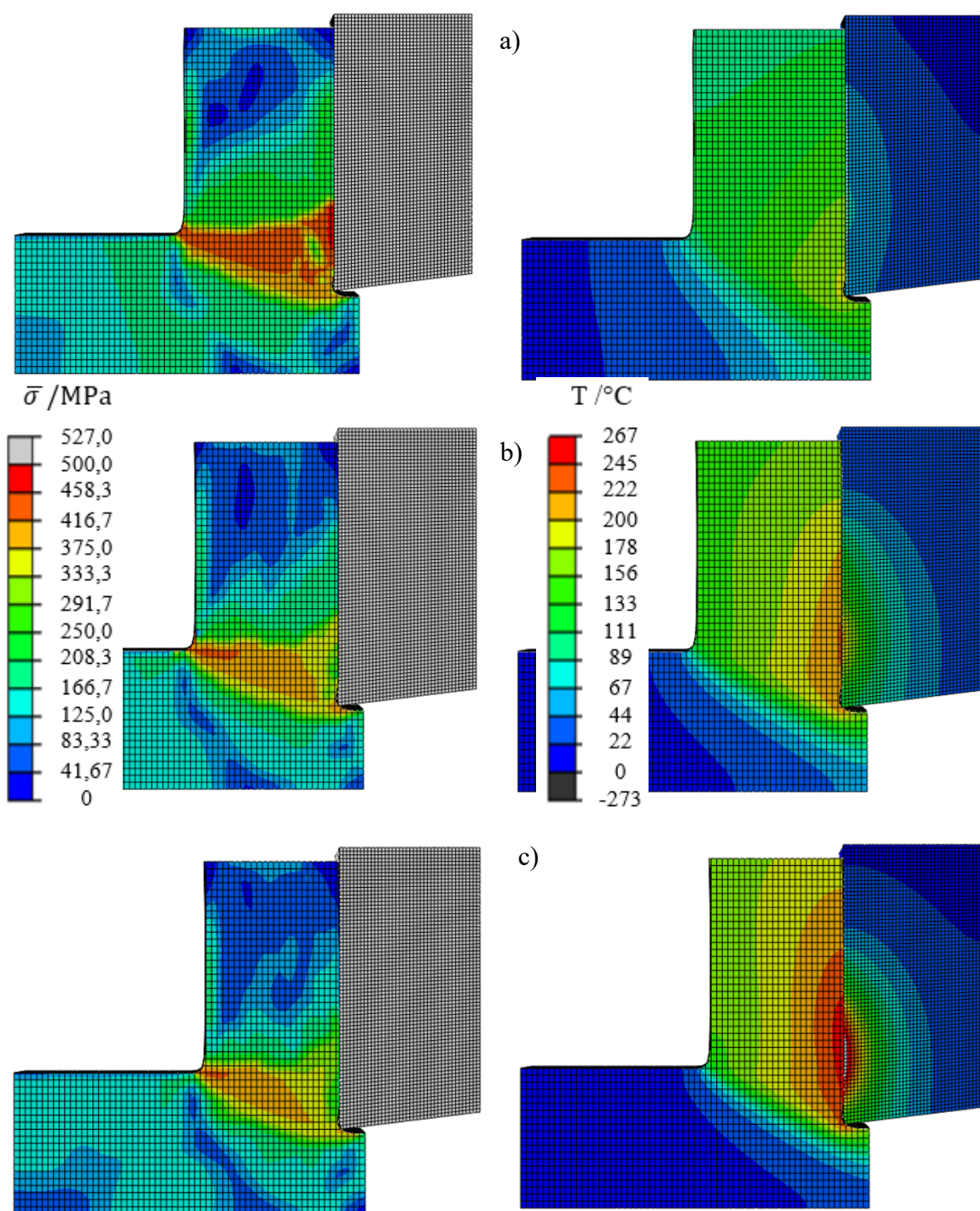
Slika 9.15. Raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom za:

a)  $v_c=93$  m/min,  $f = 0,05$  mm/o

b)  $v_c=233$  m/min,  $f = 0,05$  mm/o

c)  $v_c=373$  m/min,  $f = 0,05$  mm/o



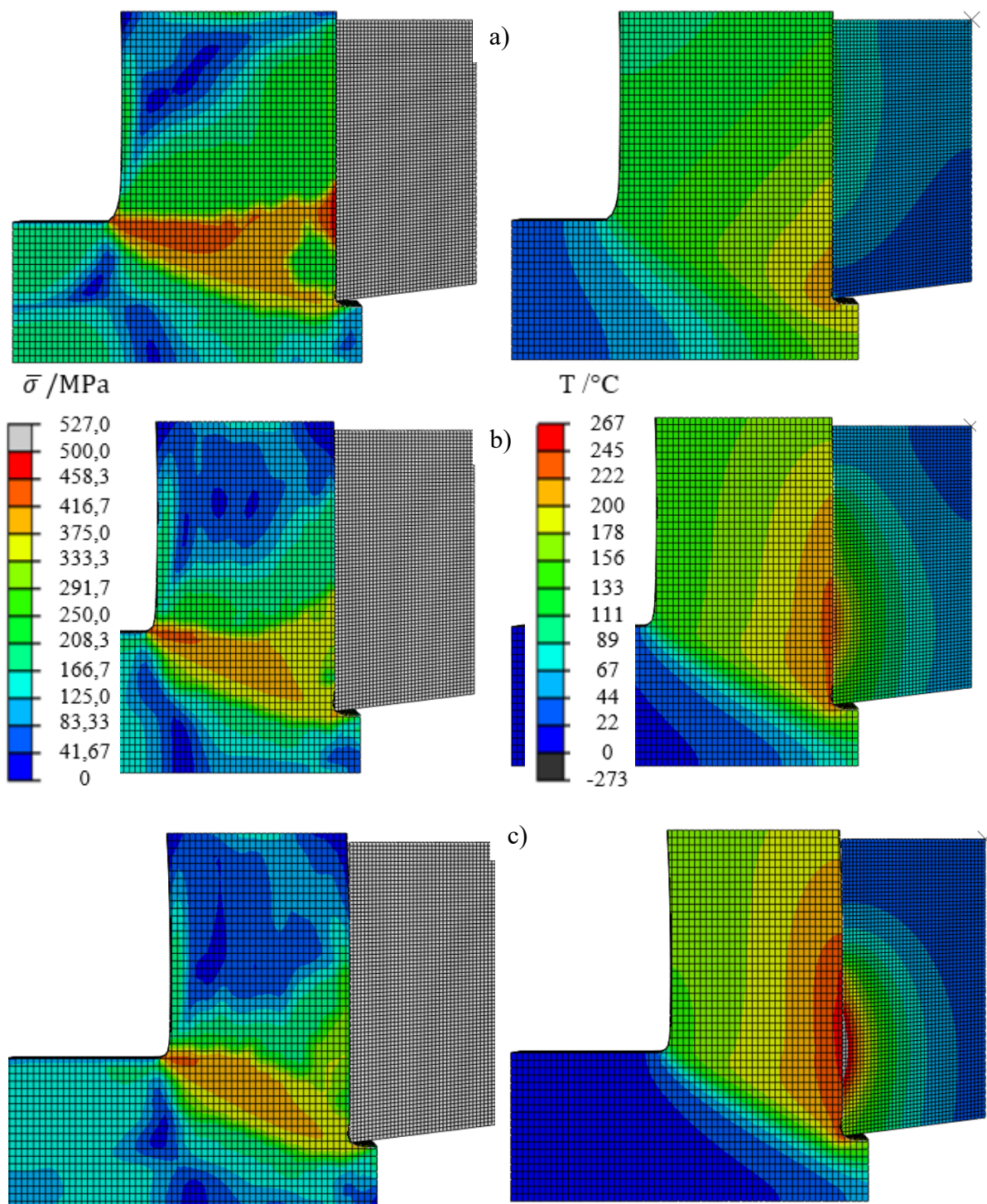


Slika 9.16. Raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom za:

a)  $v_c=93$  m/min,  $f = 0,08$  mm/o

b)  $v_c=233$  m/min,  $f = 0,08$  mm/o

c)  $v_c=373$  m/min,  $f = 0,08$  mm/o



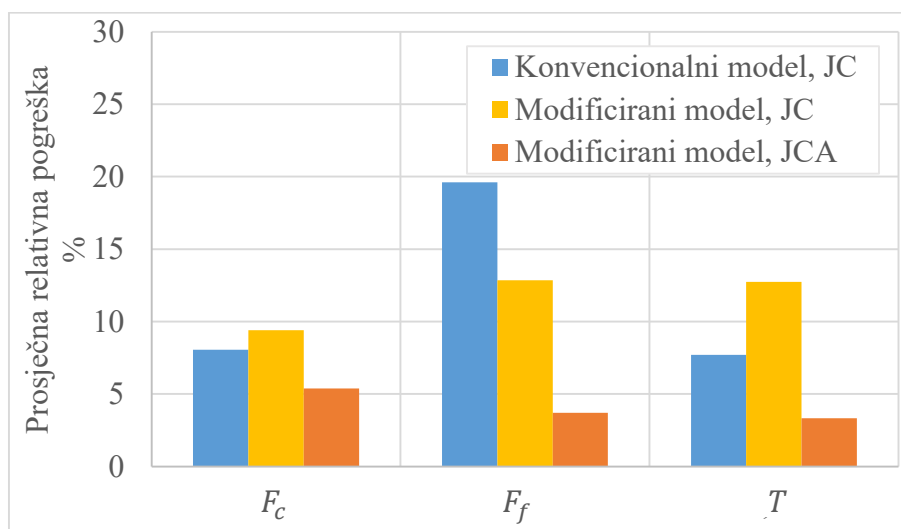
Slika 9.17. Raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom za:

a)  $v_c=93$  m/min,  $f = 0,11$  mm/o

b)  $v_c=233$  m/min,  $f = 0,11$  mm/o

c)  $v_c=373$  m/min,  $f = 0,11$  mm/o

Prosječna relativna pogreška za komponente sile rezanja i temperaturu u zoni rezanja (apsolutne vrijednosti) za konvencionalni i modificirani numerički model prikazana je na Slici 9.18. Primjenom JCA zakona očvršćivanja mogu se pouzdano predvidjeti komponente sile rezanja te temperatura u zoni rezanja. Ostvarena je prihvatljiva relativna pogreška svih izlaznih parametara (manja od 10 %) za široki raspon ulaznih parametara.



Slika 9.18. Usporedba rezultata dobivenih različitim numeričkim modelima

### 9.5. Prijedlog zakona očvršćivanja koji se temelji na Johnson-Cookovom zakonu očvršćivanja, Arrheniusovoj jednadžbi te sadržava tangens hiperbolnu funkciju deformacije

U samo nekoliko radova je primijenjena CEL formulacija za simulaciju obrade odvajanjem čestica aluminijskih legura. U radovima [109], [110], [113] je primijenjen neki od modela za inicijaciju i razvoj oštećenja. Nedostaci primjene tih metoda su već naglašeni. Nameće se potreba za razvojem zakona očvršćivanja koji bi sadržavao parametre koji bi opisivali oštećenje u materijalu te tako simulirali realan proces odvajanja čestica. Modificirani model predstavljen u poglavlju 8.2. se ne može primijeniti ukoliko nije poznata debljina odvojene čestice (zbog rubnih uvjeta).

Trenutne metode eksperimentalnog istraživanja ponašanja materijala omogućuju točan opis naprezanja tečenja uslijed znatno manjih deformacija od onih koje se javljaju u obradi odvajanjem čestica. U eksperimentalnim istraživanjima u kojima se provodi karakterizacija

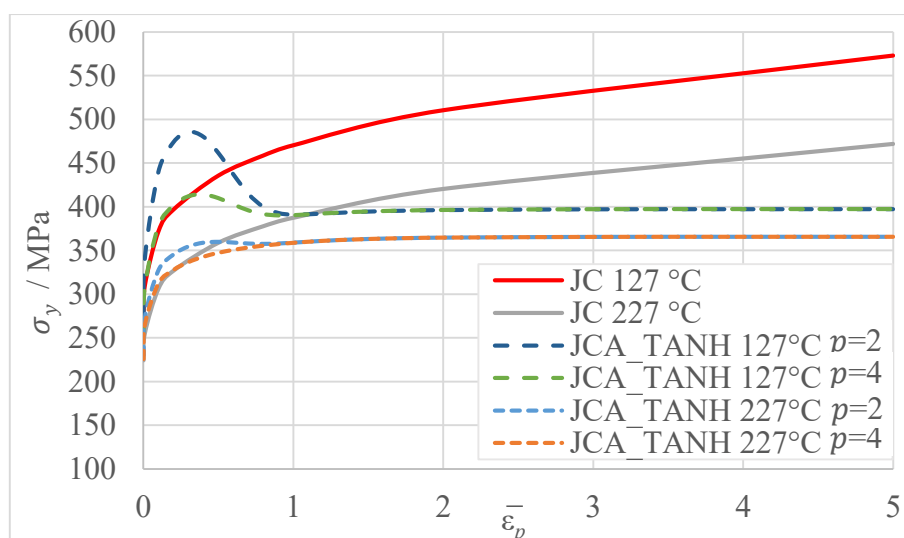
materijala moguće je maksimalno postići deformaciju do 0,5 i brzinu deformacije oko  $1000 \text{ s}^{-1}$  [92], [93], [166]. U obratku se tijekom obrade odvajanjem čestica stvaraju deformacije  $> 1$  i brzine deformacije  $> 10\,000 \text{ s}^{-1}$ . Parametri Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja preuzeti iz literature [151] su također kalibrirani na temelju eksperimentalnih podataka gdje je postignuta stvarna deformacija do 0,3. Calamaz i suradnici [167] su predstavili izmijenjeni JC zakon očvršćivanja koji su nazvali TANH zakon očvršćivanja. Pokazali su da je ovaj zakon očvršćivanja nužan za stvaranje rezane odvojene čestice (za leguru Ti-6Al-4V) jer sadrži tangens hiperbolnu (tanh) funkciju koja omogućuje smanjenje naprezanja s porastom deformacije. Do neke kritične vrijednosti plastične deformacije naprezanje tečenja se povećava uslijed porasta plastične deformacije, a nakon kritične vrijednosti naprezanje tečenja se smanjuje uslijed porasta plastične deformacije. Fizikalne pojave koje uzrokuju pad naprezanja nisu u potpunosti jasne, ali pretpostavlja se da je uzrok dinamička rekristalizacija materijala i / ili promjena faktora orijentacije kristalnog zrna [167]–[169]. Za leguru Ti-6Al-4V su predstavljeni i izmijenjeni TANH zakoni očvršćivanja [166], [170]–[172]. Ducobu i suradnici [92] su usporedili tri zakona očvršćivanja gdje je primijenjena TANH funkcija za predviđanje sile rezanja za ortogonalno rezanje Ti-6Al-4V legure. Odstupanja u predviđanju posmične sile su i preko 22 %. Primjenom TANH zakona očvršćivanja uspješno je predviđena glavna sila rezanja za Ti-6Al-4V leguru, ali pogreška u predviđanju posmične sile je od 39 % za debljinu neodrezane odvojene čestice 0,28 mm do 176 % za debljinu neodrezane odvojene čestice 0,04 mm [93]. Isti zakon očvršćivanja primijenili su Shuang i suradnici [121] za simulaciju ortogonalnog rezanja Ti-6Al-4V legure. Uspješno je predviđena rezana odvojena čestica bez primjene modela oštećenja. Prosječna pogreška u predviđanju glavne sile rezanja je 8,4 % te posmične sile 21,3 %.

U ovom doktorskom radu cilj je postaviti zakon očvršćivanja pomoću kojeg će se simulirati stvarni proces odvajanja čestica bez primjene modela oštećenja te bez primjene rubnih uvjeta koji definiraju širinu odvojene čestice. Na temelju istraživanja u literaturi te preliminarnih istraživanja predstavlja se novi zakon očvršćivanja koji se temelji na izrazu za Johnson-Cookov zakon očvršćivanja, Arrheniusovoj jednadžbi te sadržava tangens hiperbolnu funkciju. Postavljeni zakon očvršćivanja je nazvan JCA\_TANH zakon očvršćivanja te glasi:

$$\sigma_y = \left[ A + B \frac{\bar{\epsilon}_p^n}{e^{y\bar{\epsilon}_p^x}} \left( \ln \left( \frac{T}{T_T + T_0 - T} \right) \right)^p \right] \left( 1 + \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{1/n_a} + \left[ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{2/n_a} + 1 \right]^{1/2} \right\} \right) \left( 1 - \left( \ln \frac{T}{T_0} \right)^d \right) \tanh^w \bar{\epsilon}_p \quad (9.32.)$$

gdje su  $A, B$  i  $n$  parametri Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja,  $Z, A'$  i  $n_a$  parametri zakona očvršćivanja temeljenog na Arrheniusovoj jednadžbi te  $d$  parametar prilagode. Parametar  $w$  utječe na naprezanje pri relativno manjim deformacijama te parametri  $x$  i  $y$  utječu na smanjenje naprezanja uslijed povećanja deformacije pri relativno većim deformacijama. Parametar  $p$  omogućuje različito omekšavanja materijala za različite temperature. Može se uočiti da je u ovom zakonu obuhvaćen i međusobni utjecaj plastične deformacije i temperature.

Izabrane su dvije proizvoljne vrijednosti parametra  $p$ . Na Slici 9.19. prikazane su krivulje JCA\_TANH zakona očvršćivanja za različite temperature i vrijednosti parametra  $p$ . Može se uočiti da manje vrijednosti parametra  $p$  uzrokuju veće omekšavanje materijala s porastom plastične deformacije.



Slika 9.19. Ovisnost naprezanja tečenja o ekvivalentnoj plastičnoj deformaciji za različite zakone očvršćivanja pri razmatranoj vrijednosti  $\dot{\epsilon}_p = 50\,000\text{ s}^{-1}$

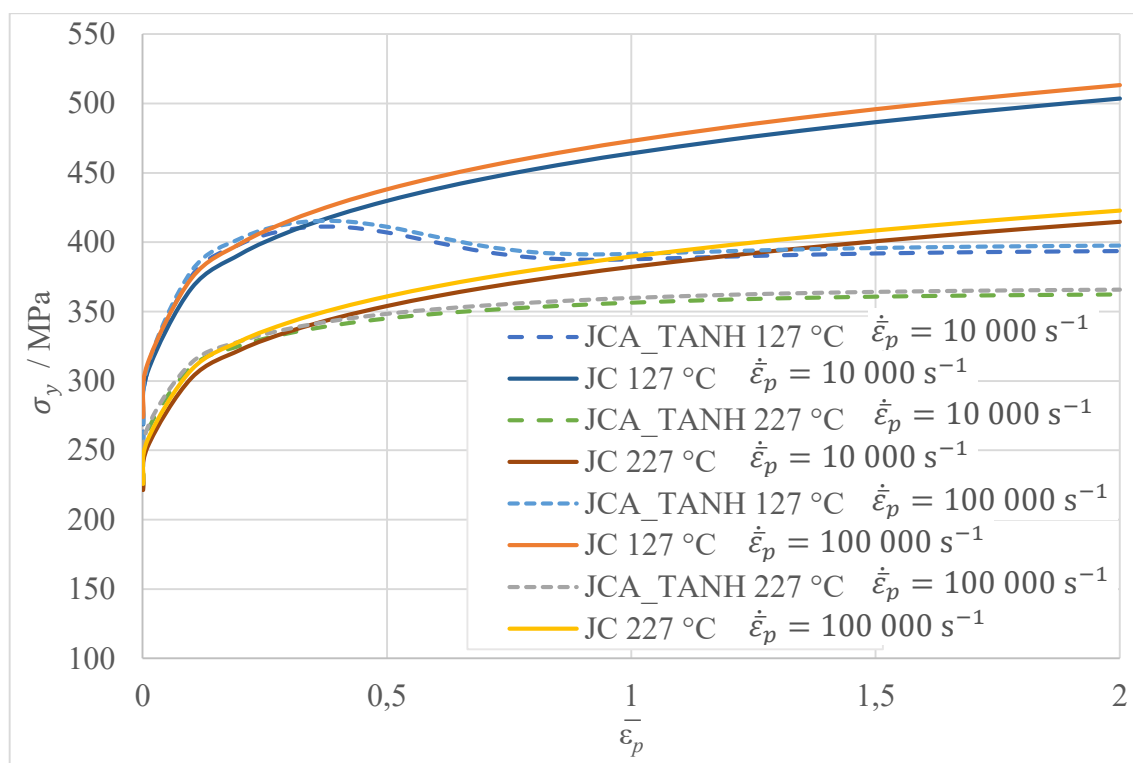
Vrijednosti parametara JCA\_TANH zakona očvršćivanja za EN AW 6082 T6 su prikazane u Tablici 9.7. Vrijednost parametara JCA zakon očvršćivanja su nepromijenjeni (Tablica 9.5.). Parametri  $p, w, x$  i  $y$  su određeni metodom pokušaja i pogreške. Cilj je bio simuliranje realnog procesa odvajanja čestica tj. nastajanja odvojene čestice za različite parametre obrade.

9. Numeričko predviđanje ortogonalnog rezanja primjenom izrađenih modela te različitih zakona očvršćivanja

Tablica 9.7. Parametri JCA\_TANH zakona očvršćivanja za EN AW 6082 T6

| A<br>MPa | B<br>MPa | n     | Q<br>J/mol | A'<br>s <sup>-1</sup>   | n <sub>a</sub> | d | p | x | y | w    |
|----------|----------|-------|------------|-------------------------|----------------|---|---|---|---|------|
| 201,55   | 250,87   | 0,206 | 162 595    | 7,09 · 10 <sup>20</sup> | 89,28          | 5 | 4 | 3 | 5 | 0,07 |

Usporedba krivulja JC zakona očvršćivanja i krivulja JCA\_TANH zakona očvršćivanja za različite temperature i brzine deformacije je prikazana na Slici 9.20. Može se uočiti da su krivulje za JC i JCA\_TANH zakon očvršćivanja slične pri manjim plastičnim deformacijama (do 0,3). Za niže temperature izraženije je omekšavanje materijala porastom deformacije te ono ranije nastupa. Za više temperature omekšavanje materijala nije izraženo, ali nema ni značajnog porasta napreznja s povećanjem deformacije (nakon 0,5) kao što je slučaj kod JC zakona očvršćivanja.



Slika 9.20. Ovisnost napreznja tečenja o ekvivalentnoj plastičnoj deformaciji za različite zakone očvršćivanja pri razmatranoj vrijednosti  $\dot{\epsilon}_p = 10\,000\text{ s}^{-1}$  i  $\dot{\epsilon}_p = 100\,000\text{ s}^{-1}$

JCA\_TANH zakon očvršćivanja te njegove parcijalne derivacije su zapisane u programski paket FORTRAN. Parcijalne derivacije JCA\_TANH zakona očvršćivanja glase:

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial \bar{\varepsilon}_p} = \frac{\left\{ \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{1}{n_a}} + \left[ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{2}{n_a}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} + 1 \right\} \left( \left( \ln \frac{T}{T_0} \right)^d - 1 \right) e^{-y \bar{\varepsilon}_p^x} \tanh^{w-1} \bar{\varepsilon}_p}{\bar{\varepsilon}_p} \quad (9.33.)$$

$$\frac{\left[ -A w \bar{\varepsilon}_p e^{y \bar{\varepsilon}_p^x} - B w \bar{\varepsilon}_p^{n+1} \left( \ln \left( \frac{T}{T_T + T_0 - T} \right) \right)^p \right] \operatorname{sech}^2 \bar{\varepsilon}_p + \left[ B \left( \ln \left( \frac{T}{T_T + T_0 - T} \right) \right)^p (x y \bar{\varepsilon}_p^{x+n} - n \bar{\varepsilon}_p^n) \right] \tanh \bar{\varepsilon}_p}{\bar{\varepsilon}_p}$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial \dot{\bar{\varepsilon}}_p} = \frac{\left[ A + B \frac{\bar{\varepsilon}_p^n}{e^{y \bar{\varepsilon}_p^x}} \left( \ln \left( \frac{T}{T_T + T_0 - T} \right) \right)^p \right] \left( 1 - \left( \ln \frac{T}{T_0} \right)^d \right) \tanh^w \bar{\varepsilon}_p \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{1}{n_a}}}{n_a \dot{\bar{\varepsilon}}_p \left[ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{2}{n_a}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (9.34.)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial T} = \frac{-d \tanh^w \bar{\varepsilon}_p \left( \ln \frac{T}{T_0} \right)^{d-1} \left[ A + B \frac{\bar{\varepsilon}_p^n}{e^{y \bar{\varepsilon}_p^x}} \left( \ln \left( \frac{T}{T_T + T_0 - T} \right) \right)^p \right]}{T} \quad (9.35.)$$

$$\frac{\left\{ \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{1}{n_a}} + \left[ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{2}{n_a}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} + 1 \right\}}{T} +$$

$$\frac{B p \bar{\varepsilon}_p^n \tanh^w \bar{\varepsilon}_p e^{-y \bar{\varepsilon}_p^x} (T_T + T_0 - T) \left( \frac{T}{(T_T + T_0 - T)^2} + \frac{1}{T_T + T_0 - T} \right) \left( 1 - \left( \ln \frac{T}{T_0} \right)^d \right) \left( \ln \left( \frac{T}{T_T + T_0 - T} \right) \right)^{p-1}}{T}$$

$$\frac{\left\{ \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{1}{n_a}} + \left[ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{2}{n_a}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} + 1 \right\}}{T} +$$

$$\frac{\tanh^w \bar{\varepsilon}_p \left\{ \frac{Q \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{2}{n_a}}}{R n_a T^2 \left[ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{2}{n_a}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}}} - \frac{Q \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{1}{n_a}}}{R n_a T^2} \right\} \left( 1 - \left( \ln \frac{T}{T_0} \right)^d \right) \left[ A + B \frac{\bar{\varepsilon}_p^n}{e^{y \bar{\varepsilon}_p^x}} \left( \ln \left( \frac{T}{T_T + T_0 - T} \right) \right)^p \right]}{\left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{1}{n_a}} + \left[ \left( \frac{Z}{A'} \right)^{\frac{2}{n_a}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

**9.6. Numerička analiza: procjena točnosti predviđanja sila rezanja i temperature u zoni rezanja za različite ulazne parametre primjenom zakona očvršćivanja koji se temelji na Johnson-Cookovom zakonu očvršćivanja, Arrheniusovoj jednadžbi i sadržava tangens hiperbolnu funkciju deformacije**

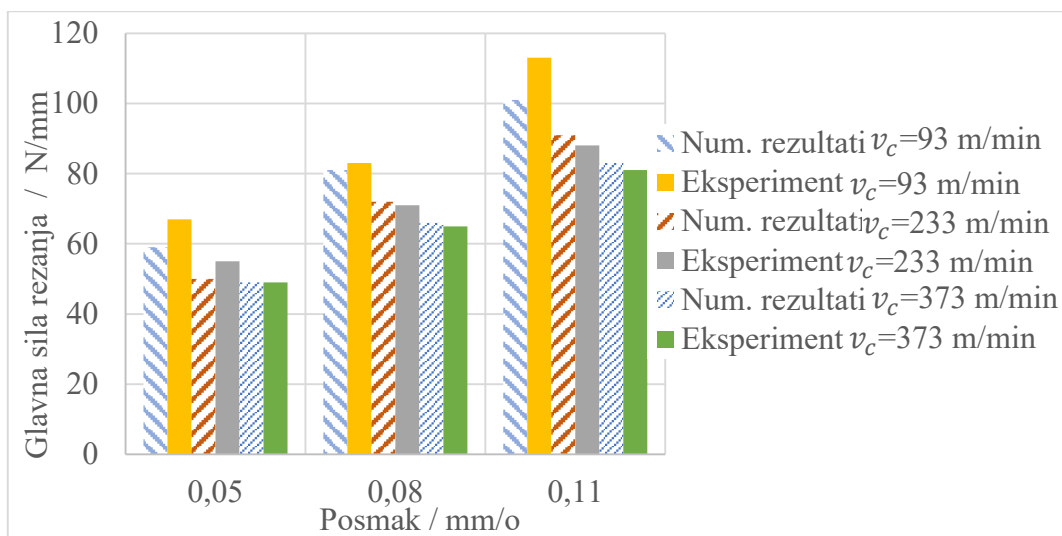
JCA\_TANH zakon očvršćivanja te njegove parcijalne derivacije su zapisane u programski paket FORTRAN kako bi se simulirao postupak ortogonalnog rezanja. Ulazni parametri i numeričke postavke su jednake onima opisanim u poglavlju 8.2. Izmijenjeni su rubni uvjeti odnosno, na gornjoj strani obratka nisu spriječeni pomaci. Za opis ponašanja materijala obratka primijenjen je JCA\_TANH zakona očvršćivanja. Vrijednosti parametara ovog zakona očvršćivanja su prikazane u Tablici 9.7. Obzirom da je primijenjen Zorevljev model trenja, usvojena je vrijednost smične granice tečenja obratka za koju je za razmatranu brzinu rezanja i posmak ostvarena najbolja predviđanja sila rezanja. Uočeno je da za najmanji posmak nije potrebno primijeniti smičnu granicu tečenja odnosno primijenio se Coulombov model trenja, Tablica 9.8. Koeficijent prijelaza topline između obratka i okoline te alata i okoline je  $150 \text{ kW/m}^2\text{K}$ . Rezultati komponenti sile rezanja i temperature odvojene čestice za definirani plan eksperimenata predviđeni numeričkim postupkom su prikazani u Tablici 9.8. U Tablici 9.8. su također prikazane relativne pogreške za promatrane izlazne veličine ortogonalnog rezanja ( $F_{c,e}$ ,  $F_{f,e}$ ,  $T_e$ ).

Tablica 9.8. Ulazne veličine te rezultati numeričkih simulacija primjenom JCA\_TANH zakona očvršćivanja; koeficijent prijelaza topline  $150 \text{ kW/m}^2\text{K}$

| Redni broj                       | $v_c$<br>m/min | $f$<br>mm/o | $\tau_Y$<br>MPa | $F_c$<br>N/mm | $F_{c,e}$<br>% | $F_f$<br>N/mm | $F_{f,e}$<br>% | $T$<br>°C | $T_e$<br>% |
|----------------------------------|----------------|-------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|-----------|------------|
| 1                                | 93             | 0,05        | /               | 59            | -11,94         | 35            | -14,63         | 119       | 1,71       |
| 2                                | 233            | 0,05        | /               | 50            | -9,09          | 27            | -12,90         | 165       | 3,13       |
| 3                                | 373            | 0,05        | /               | 49            | 0,00           | 26            | -7,14          | 191       | -0,52      |
| 4                                | 93             | 0,08        | 410             | 81            | -2,41          | 47            | 0,00           | 129       | 8,40       |
| 5                                | 233            | 0,08        | 380             | 72            | 1,41           | 36            | 0,00           | 171       | 5,56       |
| 6                                | 373            | 0,08        | 350             | 66            | 1,54           | 31            | 0,00           | 191       | 0,53       |
| 7                                | 93             | 0,11        | 270             | 101           | -10,62         | 56            | -5,09          | 139       | 15,83      |
| 8                                | 233            | 0,11        | 250             | 91            | 3,41           | 43            | 4,88           | 174       | 2,96       |
| 9                                | 373            | 0,11        | 230             | 83            | 2,47           | 36            | 9,09           | 187       | -6,50      |
| Prosječna relativna pogreška / % |                |             |                 |               | 4,77           |               | 5,97           |           | 2,51       |

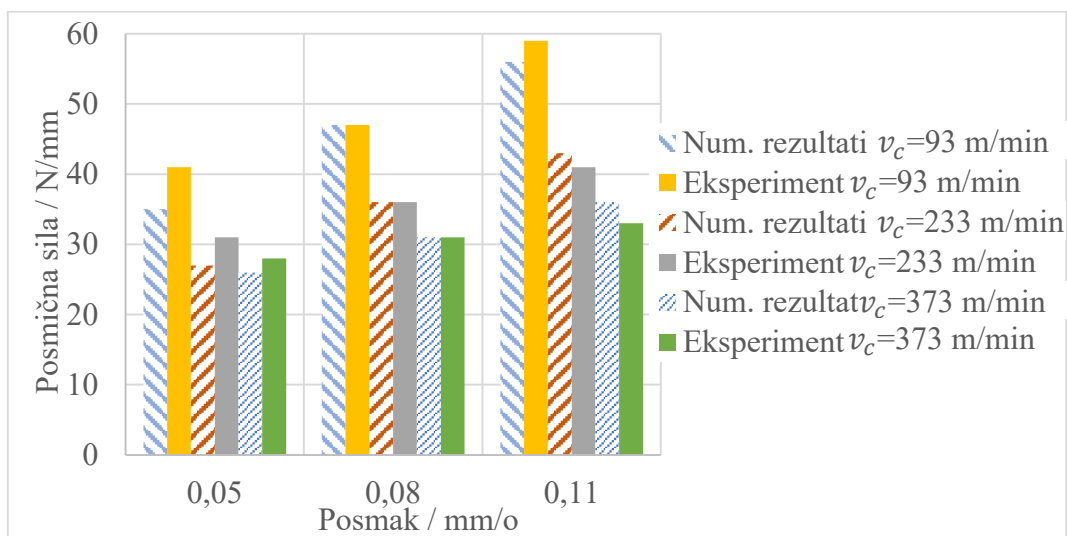


Rezultati numeričkih simulacija su uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima za sve kombinacije razmatranih parametara obrade. Usporedba vrijednosti glavnih sila rezanja za ortogonalno rezanje koje su dobivene numeričkom analizom i eksperimentalnim ispitivanjima je prikazana na Slici 9.21.



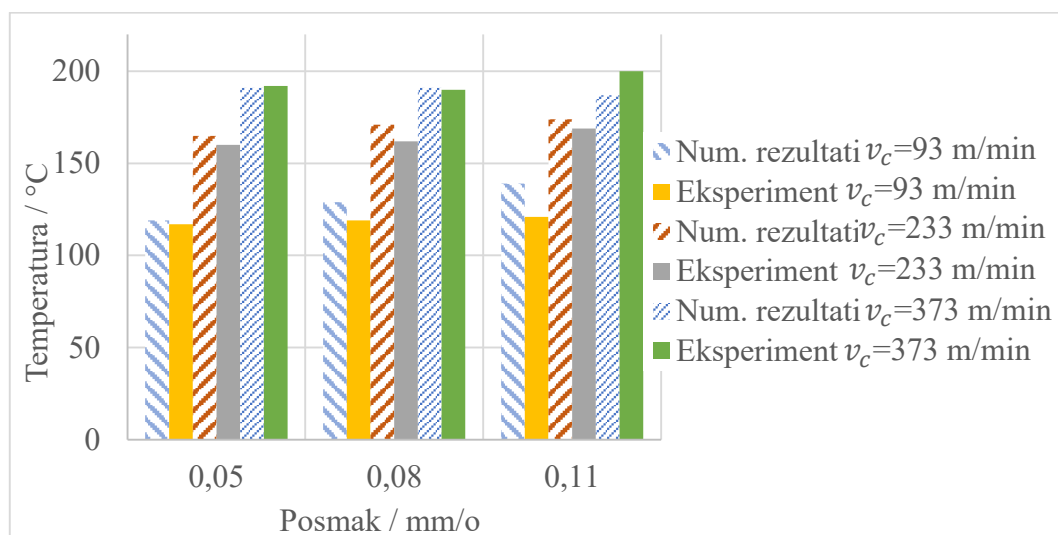
Slika 9.21. Usporedba vrijednosti glavne sile predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti

Usporedba vrijednosti posmičnih sila za ortogonalno rezanje koje su dobivene numeričkom analizom i eksperimentalnim ispitivanjima je prikazana na Slici 9.22.



Slika 9.22. Usporedba vrijednosti posmične sile predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti

Glavna sila rezanja te posmična sila su dobro previđene za sve kombinacije ulaznih parametara te je relativna pogreška unutar 15 %. JCA\_TANH zakon očvršćivanja pouzdano obuhvaća omekšavanje materijala uslijed povećanja temperature te povećanja plastičnih deformacije. Usporedba temperature u zoni rezanja dobivene numeričkom analizom i eksperimentalnim ispitivanjima je prikazana na Slici 9.23.



Slika 9.23. Usporedba vrijednosti temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom i eksperimentalnih vrijednosti

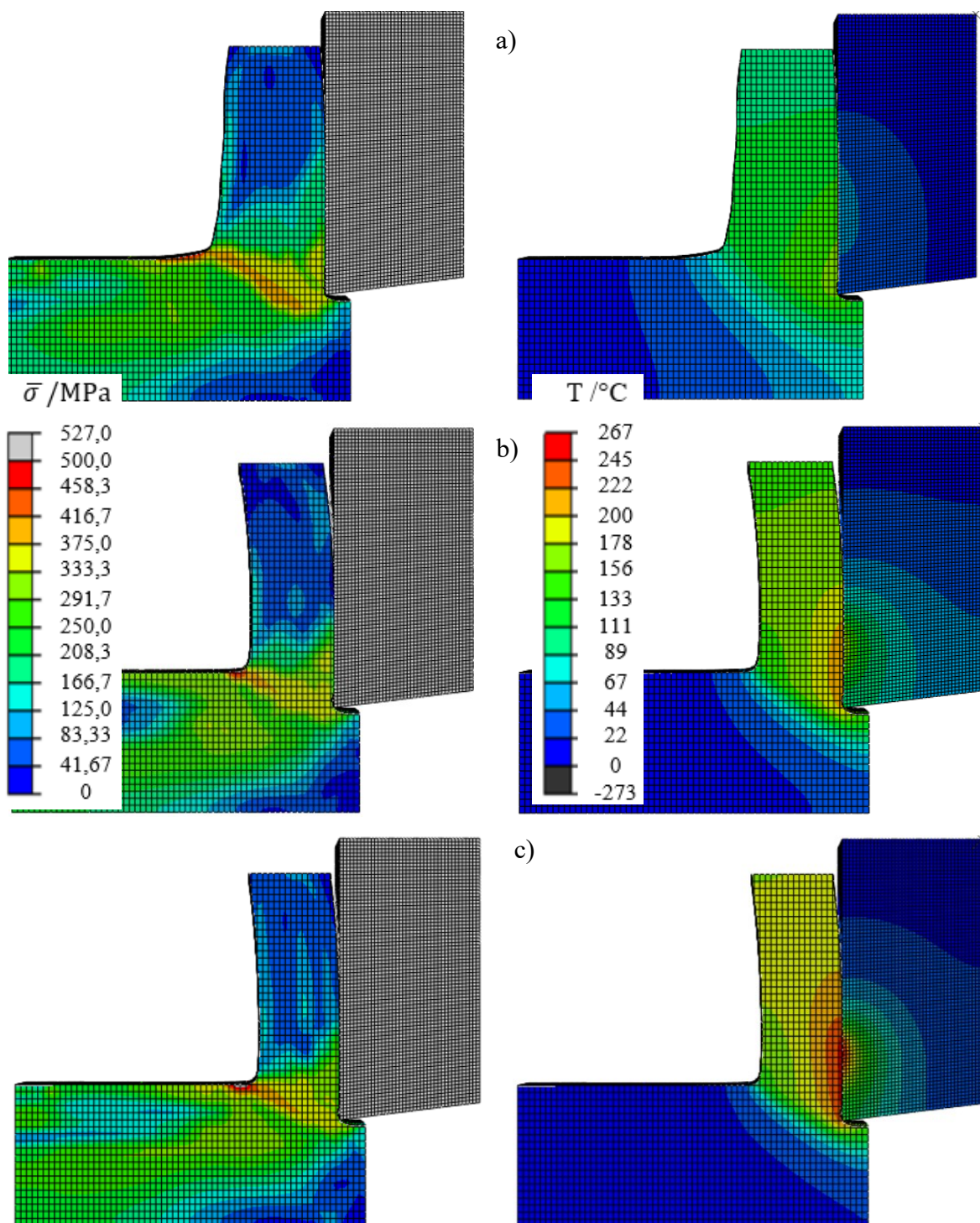
Primjenom JCA\_TANH zakona očvršćivanja utjecaj porasta temperature dovoljan je za smanjenje glavne sile rezanja. Temperatura u zoni rezanja je dobro predviđena za sve kombinacije ulaznih parametara te je relativna pogreška unutar 16 %. U Prilogu C prikazane su vrijednosti glavne sile rezanja, posmične sile te temperature u vremenu predviđene numeričkim postupkom gdje je primijenjen JCA\_TANH zakon očvršćivanja.

Usporedba eksperimentalnih rezultata i numeričkih predviđanja debljine odvojene čestice za različite parametre obrade je prikazana u Tablici 9.9. Debljina odvojene čestice predviđena numeričkim modelom je manja za sve kombinacije ulaznih parametara te je relativna pogreška unutar 31 %. Primjenom JCA\_TANH zakona očvršćivanja su lošije predviđene debljine odvojene čestice u odnosu na konvencionalni model i JC zakon očvršćivanja. Međutim, navedeno nije utjecalo na uspješnost predviđanja sila rezanja te temperature u zoni rezanja.

Tablica 9.9. Parametri obrade i rezultati mjerenja debljine odvojene čestice

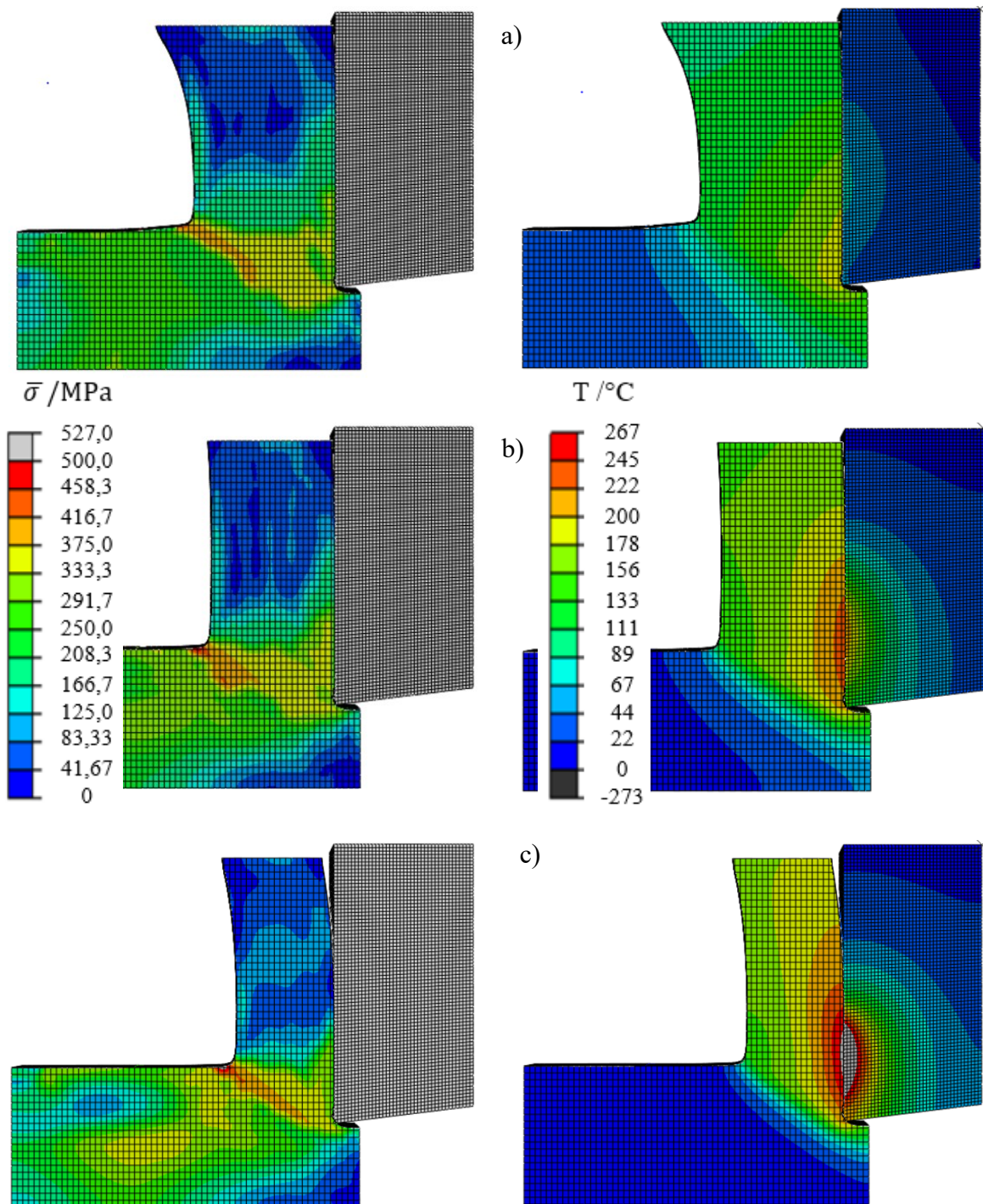
| $v_c$<br>m/min | $f$<br>mm/o | $h_1$ (eksperiment)<br>mm | $h_1$ (num. rezultati)<br>mm | Relativna pogreška<br>% |
|----------------|-------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 93             | 0,05        | 0,180                     | 0,151                        | -16,11                  |
| 233            | 0,05        | 0,171                     | 0,127                        | -25,73                  |
| 373            | 0,05        | 0,163                     | 0,116                        | -28,83                  |
| 93             | 0,08        | 0,232                     | 0,202                        | -12,93                  |
| 233            | 0,08        | 0,220                     | 0,176                        | -20,00                  |
| 373            | 0,08        | 0,204                     | 0,142                        | -30,39                  |
| 93             | 0,11        | 0,308                     | 0,265                        | -13,96                  |
| 233            | 0,11        | 0,268                     | 0,238                        | -11,19                  |
| 373            | 0,11        | 0,252                     | 0,178                        | -29,36                  |

Na Slici 9.24., Slici 9.25. i Slici 9.26 prikazana je raspodjela ekvivalentnog von Mises naprezanja u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja za sve simulacije gdje je primijenjen JCA\_TANH zakon očvršćivanja. Primjenom JCA\_TANH zakona očvršćivanja ekvivalentno naprezanje je manje u odnosu kada je primijenjen JCA zakon očvršćivanja (Slika 9.15., Slika 9.16., Slika 9.17.). Navedeno je rezultiralo i manjim predviđenim silama rezanja. Temperature u odvojenoj čestici su neznatno veće primjenom JCA\_TANH zakona očvršćivanja (do nekoliko stupnjeva) u odnosu kada je primijenjen JCA zakon očvršćivanja.



Slika 9.24. Raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom za:

- a)  $v_c = 93 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,05 \text{ mm/o}$
- b)  $v_c = 233 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,05 \text{ mm/o}$
- c)  $v_c = 373 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,05 \text{ mm/o}$

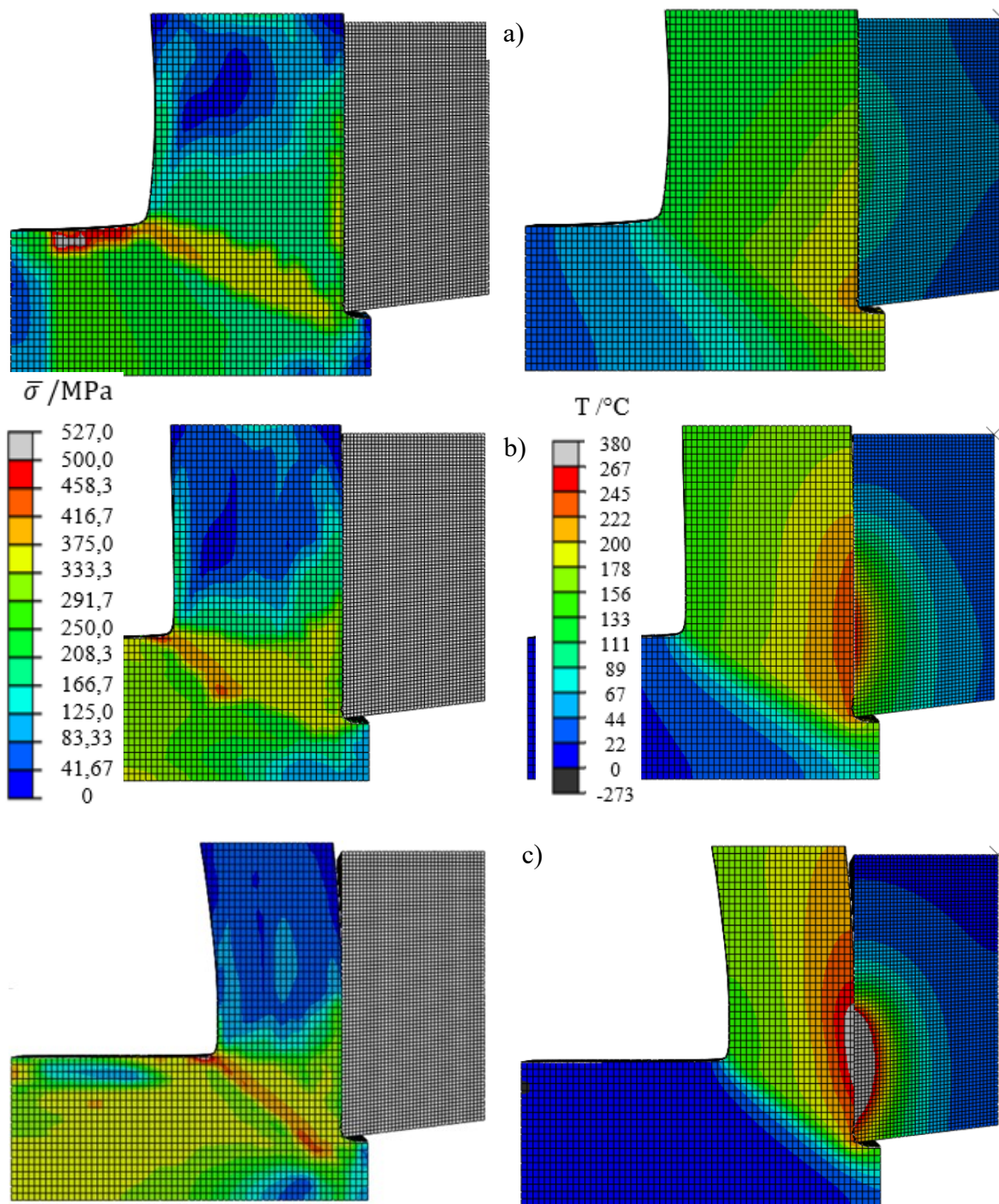


Slika 9.25. Raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom za:

a)  $v_c=93$  m/min,  $f=0,08$  mm/o

b)  $v_c=233$  m/min,  $f=0,08$  mm/o

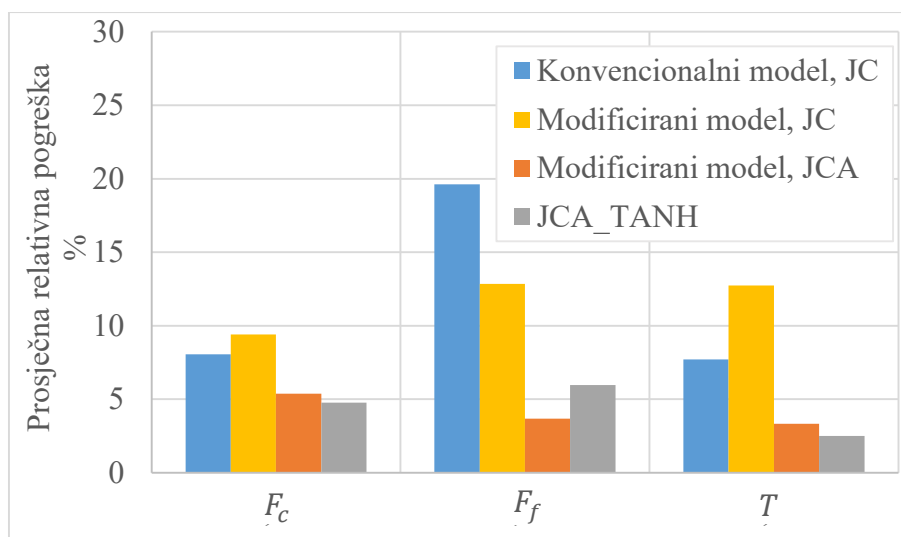
c)  $v_c=373$  m/min,  $f=0,08$  mm/o



Slika 9.26. Raspodjela ekvivalentnog naprezanje u obratku i odvojenoj čestici te raspodjela temperature u zoni rezanja predviđene numeričkim postupkom za:

- a)  $v_c=93 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,11 \text{ mm/o}$
- b)  $v_c=233 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,11 \text{ mm/o}$
- c)  $v_c=373 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,11 \text{ mm/o}$

Prosječna relativna pogreška za komponente sile rezanja i temperaturu u zoni rezanja (apsolutne vrijednosti) za različite numeričke modele i zakone očvršćivanja prikazana je na Slici 9.27. Najveća odstupanja su u predviđanju posmične sile i to primjenom konvencionalnog modela i Johnson-Cookovog zakona očvršćivanja gdje je pogreška od 2 % do 25 % ovisno o parametrima obrade. Primjenom JCA i JCA\_TANH zakona očvršćivanja pogreška u predviđanju posmične sile je značajno smanjena. Oba zakona se mogu smatrati prikladnima jer su dobro opisali ponašanje materijala pri velikim deformacijama, brzinama deformacija i temperaturama. Primjenom JCA zakona očvršćivanja manje su pogreške u predviđanju izlaznih parametara (relativna pogreška do 10 %) u odnosu kada je primijenjen JCA\_TANH zakon očvršćivanja (relativna pogreška do 15 %). Međutim, kada se u numeričkim modelima primjenjuje JCA zakona očvršćivanja, potrebno je poznavati debljinu odvojene čestice što za JCA\_TANH zakon nije slučaj. Za JCA\_TANH zakon je potrebno poznavati veći broj parametara.



Slika 9.27. Usporedba rezultata dobivenih različitim numeričkim modelima

Može se zaključiti da je glavni nedostatak JC zakona taj što ne može ispravno predvidjeti ponašanje materijala pri velikim deformacijama te ne obuhvaća međusobni utjecaj deformacije, brzine deformacije i temperature. Primjenom Arrheniusove jednadžbe, koja uzima u obzir međusobno utjecaj temperature i brzine deformacije, značajno su bolje predviđene komponente sile rezanja i temperatura u zoni rezanja. Primjenom JCA\_TANH zakona očvršćivanja, koji uzima u obzir i utjecaj temperature na plastične deformacije te omekšavanje materijala uslijed porasta plastične deformacije, može se modelirati stvarni proces nastajanja odvojene čestice.

Pri malim deformacijama, uvodeći tangens hiperbolnu funkciju utjecaj plastične deformacije na naprezanje tečenja je ostao nepromijenjen. Omekšavanje materijala se pojavljuje pri većim deformacijama. Primjenom ovog zakona su dobro predviđene komponente sile rezanja i temperatura u zoni rezanja.

Također se može zaključiti da za aluminijevu leguru EN AW 6082 T6, omekšavanje zbog povećanja temperature ima veći utjecaj od očvršćivanja zbog povećanja brzine deformacije.

Nakon što su postavljeni ispravni numerički modeli, rezultate numeričkih modela je potrebno statistički obraditi kako bi se provela optimizacija ulaznih parametara. Navedeno je prezentirano u sljedećem poglavlju.



## 10. STATISTIČKA OBRADA REZULTATA DOBIVENIH NUMERIČKIM MODELIRANJE I OPTIMIZACIJA ULAZNIH PARAMETARA ORTOGONALNOG REZANJA

U nastavku su prezentirani rezultati statističke obrade rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem ortogonalnog rezanja. Korišten je softver Design Expert 7.0 te je polazni matematički model polinom drugog reda, jednadžba 6.1. Razmatrani su rezultati numeričkih simulacija gdje su primijenjeni JCA zakon očvršćivanja i JCA\_TANH zakon očvršćivanja. Cilj statističke obrade je dobivanje matematičkih modela pomoću kojih će se provesti optimizacija parametara obrade ortogonalnog rezanja. S ciljem eliminacije odnosno smanjenja broja eksperimenata, optimalni parametri obrade dobiveni numeričkim postupkom te dobiveni na temelju eksperimentalnih mjerenja bi trebali biti približno jednaki. Navedeno je potvrđeno na kraju ovog poglavlja.

### 10.1. JCA zakon očvršćivanja

Rezultati numeričkog modela u kojem je primijenjen JCA zakon očvršćivanja su prikazani u Tablici 9.6. Navedeni rezultati su primijenjeni za statističku obradu koja je prikazana u nastavku.

#### 10.1.1. Matematički modeli komponenti sile ortogonalnog rezanja

Nakon odabira oblika modela provedena je analiza varijance (ANOVA) formiranih modela. U Tablici 10.1. je predstavljena analiza varijance za komponentu sile ortogonalnog rezanja  $F_c$ .  $F$ -vrijednost modela iznosi 366,40 i ukazuje na značajnost modela. Kako bi u model bili uključeni samo značajni članovi, provedena je spomenuta redukcija modela. Koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9946$  pokazuje da je model reprezentativan. Razlika između  $R_{adj}^2$  ( $R_{adj}^2 = 0,9919$ ) i  $R_{pred}^2$  ( $R_{pred}^2 = 0,9690$ ) je manja od 0,2, a adekvatna preciznost je veća od traženog minimuma koji iznosi četiri. Matematički model za izračunavanje komponente sile ortogonalnog rezanja  $F_c$  ima oblik:

$$F_c = 32,18233 - 0,071998v_c + 841,36905f - 0,892857v_c f + 0,000175v_c^2 \quad (10.1.)$$

10. Statistička obrada rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem i optimizacija ulaznih parametara ortogonalnog rezanja

Tablica 10.1. Analiza varijance za glavnu silu rezanja  $F_c$ ; rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem i primjenom JCA zakona očvršćivanja

|                      | Br. stupnjeva slobode | Suma kvadrata odstupanja | Srednji kvadrat odstupanja | F-vrijednost | Prob>F  |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|--------------|---------|
| Model                | 4                     | 2710,89                  | 677,72                     | 366,40       | <0,0001 |
| $v_c$                | 1                     | 450,67                   | 450,67                     | 246,64       | <0,0001 |
| $f$                  | 1                     | 2166,00                  | 2166,00                    | 1171,00      | <0,0001 |
| $v_c f$              | 1                     | 56,25                    | 56,25                      | 30,41        | 0,0006  |
| $v_c^2$              | 1                     | 37,98                    | 37,98                      | 20,53        | 0,0019  |
| Ostatak              | 8                     | 14,80                    | 1,85                       |              |         |
| Odstupanje od modela | 4                     | 14,80                    | 3,70                       |              |         |
| Čista pogreška       | 4                     | 0,00                     | 0,00                       |              |         |
| Ukupno               | 12                    | 2725,69                  |                            |              |         |

U Tablici 10.2. je predstavljena analiza varijance za komponentu sile ortogonalnog rezanja  $F_f$ . F-vrijednost modela iznosi 381,09 i ukazuje na značajnost modela zbog čega je model prihvaćen i pogodan za provođenje daljnje analize. Provedena je spomenuta redukcija modela.

Tablica 10.2. Analiza varijance za posmičnu silu  $F_f$ ; rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem i primjenom JCA zakona očvršćivanja

|                      | Br. stupnjeva slobode | Suma kvadrata odstupanja | Srednji kvadrat odstupanja | F-vrijednost | Prob>F  |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|--------------|---------|
| Model                | 4                     | 1211,34                  | 302,83                     | 381,09       | <0,0001 |
| $v_c$                | 1                     | 726,00                   | 726,00                     | 913,62       | <0,0001 |
| $f$                  | 1                     | 253,50                   | 253,50                     | 319,01       | <0,0001 |
| $v_c f$              | 1                     | 121,00                   | 121,00                     | 152,27       | <0,0001 |
| $v_c^2$              | 1                     | 110,84                   | 110,84                     | 139,48       | <0,0001 |
| Ostatak              | 8                     | 6,36                     | 0,7946                     |              |         |
| Odstupanje od modela | 4                     | 6,36                     | 1,59                       |              |         |
| Čista pogreška       | 4                     | 0,00                     | 0,00                       |              |         |
| Ukupno               | 12                    | 1217,69                  |                            |              |         |

Koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9948$  pokazuje da je model reprezentativan. Razlika između  $R_{adj}^2$  ( $R_{adj}^2 = 0,9922$ ) i  $R_{pred}^2$  ( $R_{pred}^2 = 0,9660$ ) je manja od 0,2, a adekvatna preciznost je veća

od traženog minimuma koji iznosi četiri. Matematički model za izračunavanje komponente sile ortogonalnog rezanja  $F_f$  ima oblik:

$$F_f = 27,93053 - 0,11307v_c + 521,78571f - 1,30952v_c f + 0,000299v_c^2 \quad (10.2.)$$

### 10.1.2. Matematički model temperature u zoni rezanja

U Tablici 10.3. je predstavljena analiza varijance za temperaturu u zoni rezanja  $T$ .  $F$ -vrijednost modela iznosi 2913,59 i ukazuje na značajnost modela. Koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9995$  pokazuje da je model reprezentativan. Razlika između  $R_{adj}^2$  ( $R_{adj}^2 = 0,9992$ ) i  $R_{pred}^2$  ( $R_{pred}^2 = 0,9954$ ) je manja od 0,2, a adekvatna preciznost je veća od traženog minimuma koji iznosi četiri. Matematički model za izračunavanje temperature u zoni rezanja ima oblik:

$$T = 61,78958 + 0,60993v_c + 118,68090f - 1,42857v_c f - 0,00056v_c^2 + 1685,82375f^2 \quad (10.3.)$$

*Tablica 10.3. Analiza varijance za temperaturu u zoni rezanja; rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem i primjenom JCA zakona očvršćivanja*

|                      | Br. stupnjeva slobode | Suma kvadrata odstupanja | Srednji kvadrat odstupanja | $F$ -vrijednost | $Prob > F$ |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------|------------|
| Model                | 5                     | 6984,95                  | 1396,99                    | 2913,59         | <0,0001    |
| $v_c$                | 1                     | 6468,17                  | 6468,17                    | 13490,11        | <0,0001    |
| $f$                  | 1                     | 16,67                    | 16,67                      | 34,76           | 0,0006     |
| $v_c f$              | 1                     | 144,00                   | 144,00                     | 300,33          | <0,0001    |
| $v_c^2$              | 1                     | 333,14                   | 333,14                     | 694,81          | <0,0001    |
| $f^2$                | 1                     | 6,36                     | 6,36                       | 13,26           | 0,0083     |
| Ostatak              | 7                     | 3,36                     | 0,4795                     |                 |            |
| Odstupanje od modela | 3                     | 3,36                     | 1,12                       |                 |            |
| Čista pogreška       | 4                     | 0,00                     | 0,00                       |                 |            |
| Ukupno               | 12                    | 6988,31                  |                            |                 |            |

## 10.2. JCA\_TANH zakon očvršćivanja

Rezultati numeričkog modela u kojem je primijenjen JCA zakon očvršćivanja su prikazane u Tablici 9.8. navedeni rezultati su primijenjeni za statističku obradu koja je prikazana u nastavku.

### 10.2.1. Matematički modeli komponenti sile ortogonalnog rezanja

U Tablici 10.4. je predstavljena analiza varijance za komponentu sile ortogonalnog rezanja  $F_c$ . Kako bi u model bili uključeni samo značajni članovi, provedena je spomenuta redukcija modela. Koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9974$  pokazuje da je model reprezentativan. Razlika između  $R_{adj}^2$  ( $R_{adj}^2 = 0,9961$ ) i  $R_{pred}^2$  ( $R_{pred}^2 = 0,9882$ ) je manja od 0,2, a adekvatna preciznost je veća od traženog minimuma. Matematički model za izračunavanje komponente sile ortogonalnog rezanja  $F_c$  ima oblik:

$$F_c = 27,04118 - 0,05102v_c + 760,95238f - 0,47619v_c f + 0,000081v_c^2 \quad (10.4.)$$

Tablica 10.4. Analiza varijance za glavnu silu rezanja  $F_c$ ; rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem i primjenom JCA\_TANH zakona očvršćivanja

|                      | Br. stupnjeva slobode | Suma kvadrata odstupanja | Srednji kvadrat odstupanja | F-vrijednost | Prob>F  |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|--------------|---------|
| Model                | 4                     | 2613,89                  | 653,47                     | 759,75       | <0,0001 |
| $v_c$                | 1                     | 308,17                   | 308,17                     | 358,28       | <0,0001 |
| $f$                  | 1                     | 2281,50                  | 2281,50                    | 1652,54      | <0,0001 |
| $v_c f$              | 1                     | 16,00                    | 16,00                      | 18,60        | 0,0026  |
| $v_c^2$              | 1                     | 8,22                     | 8,22                       | 9,56         | 0,0149  |
| Ostatak              | 8                     | 6,88                     | 0,8601                     |              |         |
| Odstupanje od modela | 4                     | 6,88                     | 1,72                       |              |         |
| Čista pogreška       | 4                     | 0,00                     | 0,00                       |              |         |
| Ukupno               | 12                    | 2620,77                  |                            |              |         |

U Tablici 10.5. je predstavljena analiza varijance za komponentu sile ortogonalnog rezanja  $F_f$ . F-vrijednost modela iznosi 1219,00 i ukazuje na značajnost modela zbog čega je model prihvaćen i pogodan za provođenje daljnje analize. Koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9989$  pokazuje da je model reprezentativan. Razlika između  $R_{adj}^2$  ( $R_{adj}^2 = 0,9980$ ) i  $R_{pred}^2$

( $R_{pred}^2 = 0,9885$ ) je manja od 0,2, a adekvatna preciznost je veća od traženog minimuma.

Matematički model za izračunavanje komponente sile ortogonalnog rezanja  $F_f$  ima oblik:

$$F_f = 17,74497 - 0,075386v_c + 569,99247f - 0,654762v_c f + 0,000159v_c^2 - 977,01149f^2 \quad (10.5.)$$

Tablica 10.5. Analiza varijance za posmičnu silu  $F_f$ ; rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem i primjenom JCA\_TANH zakona očvršćivanja

|                      | Br. stupnjeva slobode | Suma kvadrata odstupanja | Srednji kvadrat odstupanja | F-vrijednost | Prob>F  |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|--------------|---------|
| Model                | 5                     | 763,12                   | 152,62                     | 1219,00      | <0,0001 |
| $v_c$                | 1                     | 337,50                   | 337,50                     | 2695,57      | <0,0001 |
| $f$                  | 1                     | 368,17                   | 368,17                     | 2940,50      | <0,0001 |
| $v_c f$              | 1                     | 30,25                    | 30,25                      | 241,60       | <0,0001 |
| $v_c^2$              | 1                     | 26,90                    | 26,90                      | 214,83       | <0,0001 |
| $f^2$                | 1                     | 2,14                     | 2,14                       | 17,06        | 0,0044  |
| Ostatak              | 7                     | 0.8764                   | 0,1252                     |              |         |
| Odstupanje od modela | 3                     | 0,8764                   | 0,2921                     |              |         |
| Čista pogreška       | 4                     | 0,00                     | 0,00                       |              |         |
| Ukupno               | 12                    | 764,00                   |                            |              |         |

### 10.2.2. Matematički model temperature u zoni rezanja

U Tablici 10.6. je predstavljena analiza varijance za temperaturu u zoni rezanja  $T$ . Koeficijent determinacije  $R^2 = 0,9997$  pokazuje da je model reprezentativan. Razlika između  $R_{adj}^2$  ( $R_{adj}^2 = 0,9995$ ) i  $R_{pred}^2$  ( $R_{pred}^2 = 0,9971$ ) je manja od 0,2, a adekvatna preciznost je veća od traženog minimuma. Matematički model za izračunavanje temperature u zoni rezanja ima oblik:

$$T = 43,95809 + 0,586744v_c + 695,50082f - 1,42857v_c f - 0,000549v_c^2 - 1398,46743f^2 \quad (10.6.)$$

Tablica 10.6. Analiza varijance za temperaturu u zoni rezanja; rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem i primjenom JCA\_TANH zakona očvršćivanja

|                      | Br. stupnjeva slobode | Suma kvadrata odstupanja | Srednji kvadrat odstupanja | F-vrijednost | Prob>F  |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------|--------------|---------|
| Model                | 5                     | 6181,24                  | 1236,25                    | 5705,47      | <0,0001 |
| $v_c$                | 1                     | 5520,67                  | 5520,67                    | 21013,04     | <0,0001 |
| $f$                  | 1                     | 104,17                   | 104,17                     | 396,48       | <0,0001 |
| $v_c f$              | 1                     | 144,00                   | 144,00                     | 548,10       | <0,0001 |
| $v_c^2$              | 1                     | 319,68                   | 319,68                     | 1216,80      | <0,0001 |
| $f^2$                | 1                     | 4,38                     | 4,38                       | 16,65        | 0,0047  |
| Ostatak              | 7                     | 1,84                     | 0,2627                     |              |         |
| Odstupanje od modela | 3                     | 1,84                     | 0,6130                     |              |         |
| Čista pogreška       | 4                     | 0,00                     | 0,00                       |              |         |
| Ukupno               | 12                    | 6183,08                  |                            |              |         |

### 10.3. Optimizacija ortogonalnog rezanja genetskim algoritmom

Višeciljna optimizacija je izvedena na temelju matematičkih modela predstavljenih u ovom poglavlju. Cilj optimizacije, težinski faktori, ograničenja te parametri genetskog algoritma su jednaki onima kada su primijenjeni eksperimentalni rezultati, poglavlje 6.4. Ciljne vrijednosti odgovaraju najnižim vrijednostima rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem te su prikazane u Tablici 10.7.

Tablica 10.7. Ciljne vrijednosti korištene u optimizaciji

|              | eksperiment | JCA | JCA_TANH |
|--------------|-------------|-----|----------|
| $F_c$ / N/mm | 55          | 54  | 49       |
| $F_f$ / N/mm | 28          | 28  | 26       |
| $T$ / °C     | 117         | 117 | 119      |

Optimalne vrijednosti parametara obrade dobivene genetskim algoritmom i izlazne veličine postupka za optimalne parametre dane su u Tablici 10.8.

Optimalne vrijednosti ulaznih veličina dobivene na temelju rezultata dobivenih numeričkim modelom te na temelju eksperimentalnih rezultata su približno jednake. Optimalni posmak je jednak za sve razmatrane slučajeve. Razlika u optimalnoj brzini rezanja je zanemariva što

ukazuje da se ispravnim numeričkim modelom mogu odrediti optimalni parametri obrade te eliminirati eksperimentalna ispitivanja. Sličnost optimalnih parametara obrade je i očekivana obzirom da se rezultati numeričkih simulacija poklapaju s eksperimentalnim rezultatima. Na ovaj način je potvrđeno da se pouzdanim numeričkim modelom mogu odrediti optimalni ulazni parametri te tako smanjiti ili eliminirati eksperimentalna ispitivanja.

*Tablica 10.8. Predviđene vrijednosti izlaznih veličina za optimalne vrijednosti ulaznih veličina*

|                | eksperiment | JCA      | JCA_TANH |
|----------------|-------------|----------|----------|
| $v_c$ / m/min  | 233         | 215      | 215      |
| $f$ / mm/o     | 0,05        | 0,05     | 0,05     |
| $F_c$ / N/mm   | 52          | 57       | 53       |
| $F_f$ / N/mm   | 30          | 29       | 28       |
| $T$ / °C       | 161         | 162      | 161      |
| Funkcija cilja | 1,141331    | 1,153531 | 1,154927 |

U narednom poglavlju opisana je hibridna metoda koja omogućuje predviđanje sile rezanja za postupak tokarenja (kosog rezanja) na temelju rezultata dobivenih u numeričkim simulacijama ortogonalnog rezanja.

## 11. PREDVIĐANJE SILE REZANJA ZA POSTUPAK TOKARENJA HIBRIDNOM METODOM

Glavni nedostatak numeričkog modeliranja kosog rezanja je potreba za računalnim resursima odnosno, izrazito je dugo vrijeme trajanja simulacija u odnosu na ortogonalno rezanje. S druge strane, analitički postupak ne zahtijeva puno vremena za opisivanje procesa. Međutim, potrebni su empirijski podaci o određenim specifičnim koeficijentima i veličinama kao što su kut smicanja, kut vanjskog trenja klizanja i smično naprezanje u ravnini smicanja. Stoga je potreban alternativni pristup. Određeni koeficijenti i navedene veličine se mogu dobiti pomoću numeričkog modeliranja ortogonalnog rezanja. Zatim se određenim transformacijama mogu predvidjeti izlazne veličine u različitim postupcima obrade odvajanjem čestica. U poglavlju 2 kratko je objašnjena razlika između ortogonalnog i kosog rezanja. U ovom poglavlju je detaljnije objašnjena razlika u geometriji između dva spomenuta mehanizma rezanja te predviđanje sile rezanja za postupak tokarenja (kosog rezanja) na temelju poznatih veličina dobivenih iz simulacija ortogonalnog rezanja.

### 11.1. Mehanika ortogonalnog rezanja

Komponente sile rezanja bi trebale linearno rasti s povećanjem širine rezanja i debljine neodrezane odvojene čestice. Međutim, u testovima ortogonalnog rezanja karakterističan je trend prikazan na Slici 11.1. U dijagramu ovisnosti komponenti sile rezanja ( $F_c, F_f$ ) o debljini neodrezane odvojene čestice se za slučaj  $h = 0$  dobivaju sjecišta na ordinatnoj osi koja odgovaraju komponentama rubne sile. Prema Altintasu [173] rubna sila je pokazatelj efekta veličine zaobljenja duž cijele rezne oštrice alata. Komponente rubne sile ( $F_{ce}, F_{fe}$ ) se mogu odrediti iz niza eksperimenata pri različitim brzinama rezanja i posmacima [173].

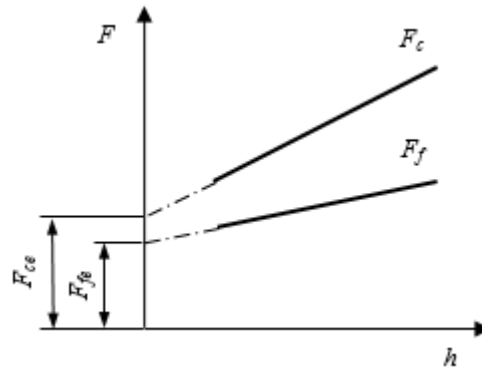
Komponente  $F_{ce}$  i  $F_{fe}$  su prisutne na prednjoj površini alata te nastaju zbog pojave gnječanja i prodiranja u tercijarnoj zoni smicanja. Uzimajući u obzir i rubnu silu, komponente sile ortogonalnog rezanja se mogu zapisati:

$$F_c = F_{cc} + F_{ce} \quad (11.1)$$

$$F_f = F_{fc} + F_{fe} \quad (11.2)$$



gdje su  $F_{cc}$  i  $F_{fc}$  komponente sile koja doprinosi stvaranju odvojene čestice.



Slika 11.1. Ovisnost komponenti sile rezanja o debljini neodrezane odvojene čestice [2]

Konstante komponenti rubne sile  $k_{ce}$ ,  $k_{fe}$  se mogu odrediti kao:

$$k_{ce} = \frac{F_{ce}}{b} \quad (11.3.)$$

$$k_{fe} = \frac{F_{fe}}{b} \quad (11.4.)$$

Prema modelu nastajanja odvojene čestice u jednoj ravni smicanja (AB) koji su postavili Time i Merchant, površina smicanja  $A_{sh}$  se može odrediti prema izrazu:

$$A_{sh} = \frac{A_0}{\sin\phi} = \frac{bh}{\sin\phi} \quad (11.5.)$$

gdje je:

$A_0$  - površina presjeka neodrezane odvojene čestice,  $\text{mm}^2$

$\phi$  - kut smicanja,  $^\circ$ .

Sa Slike 11.2. može se uočiti da se kut smicanja može odrediti prema izrazu:

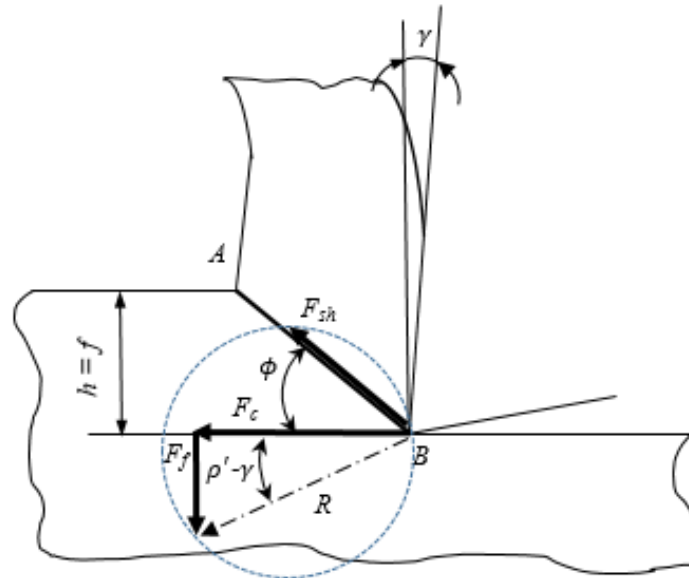
$$\text{tg}\phi = \frac{\cos\gamma}{\xi - \sin\gamma} \quad (11.6.)$$

Kut vanjskog trenja klizanja  $\rho'$  se može izračunati prema izrazu:

$$\rho' = \gamma + \text{tg}^{-1} \left( \frac{F_{fc}}{F_{cc}} \right) \quad (11.7.)$$

Pomoću Merchantovog kruga na Slici 11.2, smično naprezanje koje djeluje u ravni smicanja se može izračunati pomoću sile smicanja  $F_{sh}$ :

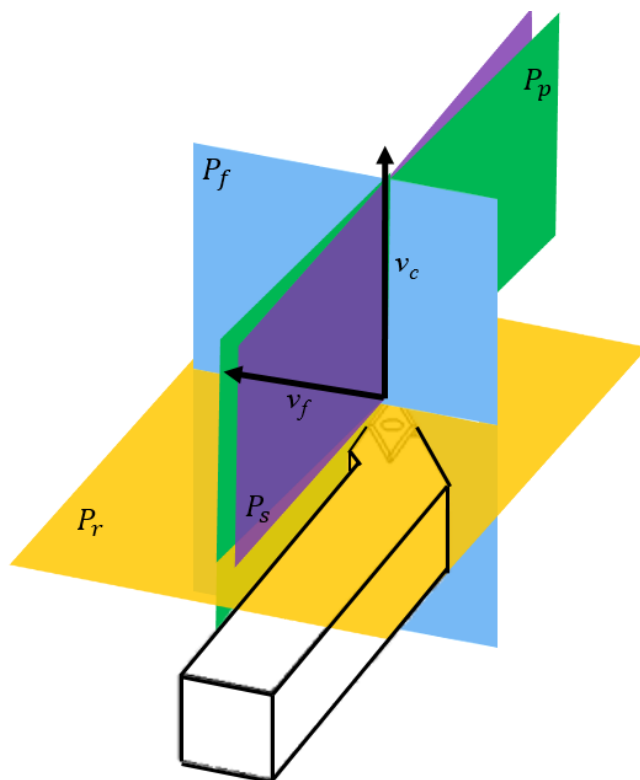
$$\tau_{sh} = \frac{F_{sh}}{A_{sh}} = \frac{(F_{cc} \cos \phi - F_{fc} \sin \phi) \sin \phi}{bh} \quad (11.8.)$$



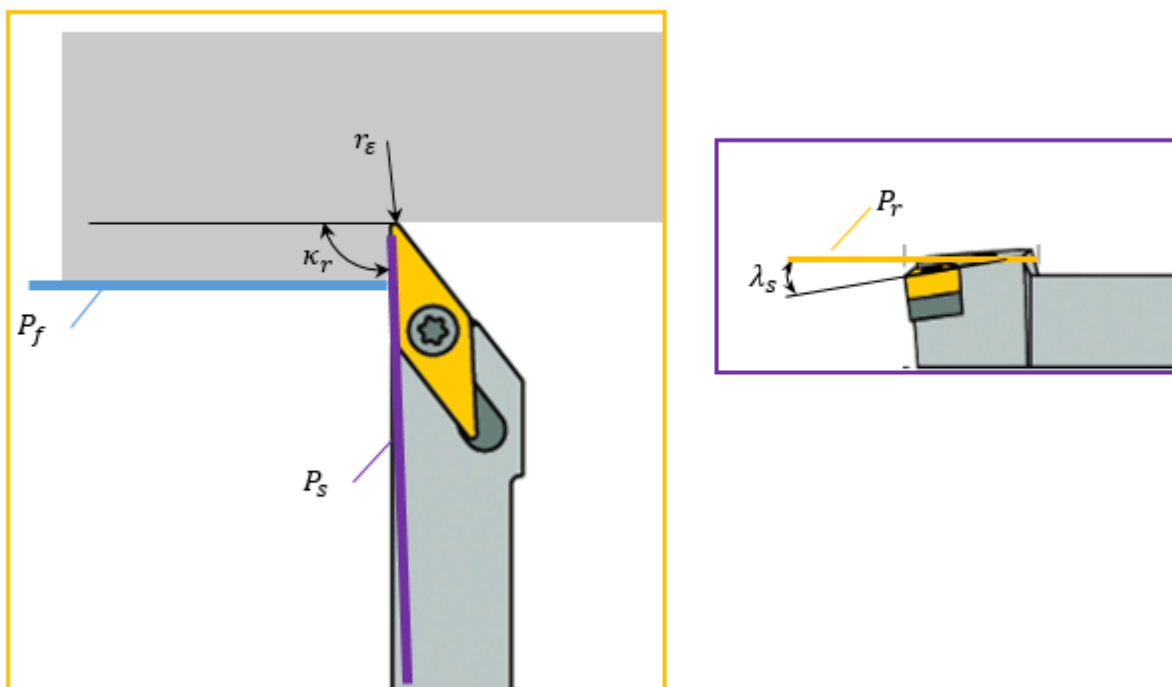
Slika 11.2. Mehanika ortogonalnog rezanja

## 11.2. Mehanika tokarenja (kosog rezanja)

Primjer kosog rezanja je postupak tokarenja. U ortogonalnom rezanju kut nagiba glavne oštrice je jednak nuli dok za slučaj kosog rezanja vektor brzine rezanja ima kut nagiba glavne oštrice  $\lambda_s \neq 0$ . Kut nagiba glavne oštrice alata  $\lambda_s$  je kut između glavne oštrice i referentne ravnine  $P_r$  i mjeri se u ravni rezanja  $P_s$ , Slika 11.3., Slika 11.4. Kut namještanja glavne oštrice alata ima oznaku  $\kappa_r$ . Obzirom da kod postupka tokarenja radijus zaobljenja vrha rezne oštrice ( $r_\epsilon$ ) utječe na veličine i smjerove djelovanja sile primjenjuje se koncept ekvivalentne rezne oštrice [174]–[176]. Wang i Mathew [176] su razvili matematički model za određivanje ekvivalentne rezne oštrice za alat sa zaobljenim vrhom koji uzima u obzir i kut nagiba glavne oštrice alata. Njihov pristup je primijenjen u okviru ovog istraživanja, ali rezultati nisu bili u skladu s eksperimentalnim podacima. Zbog toga je primijenjeno analitičko modeliranje sile rezanja koje se temelji na podjeli površine presjeka odvojene čestice na dva karakteristična segmenta te na Armaregovim transformacijama kosog rezanja [177]. Ovaj pristup je opisan u nastavku.



Slika 11.3. Ravnine u promatranoj točki glavne oštrice alata [178], [179]



Slika 11.4. Ravnine i kutovi tokarskog noža

Prema Armaregovom modelu kosog rezanja konstante kosog rezanja ( $K_{cc}, K_{fc}, K_{pc}$ ) iznose:

$$K_{cc} = \frac{\tau_{sh}}{\sin\phi_n} \frac{\cos(\rho_n - \gamma) + \operatorname{tg}\lambda_s \operatorname{tg}\eta_\gamma \sin\rho_n}{\sqrt{\cos^2(\phi_n + \rho_n - \gamma) + \operatorname{tg}^2\eta_\gamma \sin^2\rho_n}} \quad (11.9.)$$

$$K_{fc} = \frac{\tau_{sh}}{\sin\phi_n \cos\lambda_s} \frac{\sin(\rho_n - \gamma)}{\sqrt{\cos^2(\phi_n + \rho_n - \gamma) + \operatorname{tg}^2\eta_\gamma \sin^2\rho_n}} \quad (11.10.)$$

$$K_{pc} = \frac{\tau_{sh}}{\sin\phi_n} \frac{\cos(\rho_n - \gamma) \operatorname{tg}\lambda_s - \operatorname{tg}\eta_\gamma \sin\rho_n}{\sqrt{\cos^2(\phi_n + \rho_n - \gamma) + \operatorname{tg}^2\eta_\gamma \sin^2\rho_n}} \quad (11.11.)$$

gdje je:

$\phi_n$  - normalni kut smicanja

$\rho_n$  - normalni kut trenja

$\eta_\gamma$  - kut toka odvojene čestice.

Eksperimentalni podaci su ukazali da veličine  $\phi_n, \rho_n, \tau_{sh}$  ne ovise o kutu nagiba glavne oštrice kada je taj kut manji od  $40^\circ$ . Dakle, ove veličine se mogu odrediti u pokusima ortogonalnog rezanja ( $\phi_n \equiv \phi, \rho_n \equiv \rho'$ ) [2]. Također, prema Stablerovom empirijskom pravilu o toku odvojene čestice, kut toka odvojene čestice je jednak kutu nagiba glavne oštrice ( $\eta_\gamma = \lambda_s$ ) [180].

Komponente rubne sile ( $F_{ce}, F_{fe}, F_{pe}$ ) za koso rezanje iznose:

$$F_{ce} = K_{ce}b = k_{ce} \cos\lambda_s b \quad (11.12.)$$

$$F_{fe} = K_{fe}b = k_{fe} b \quad (11.13.)$$

$$F_{pe} = K_{pe}b = k_{ce} \sin\lambda_s b \quad (11.14.)$$

gdje je:

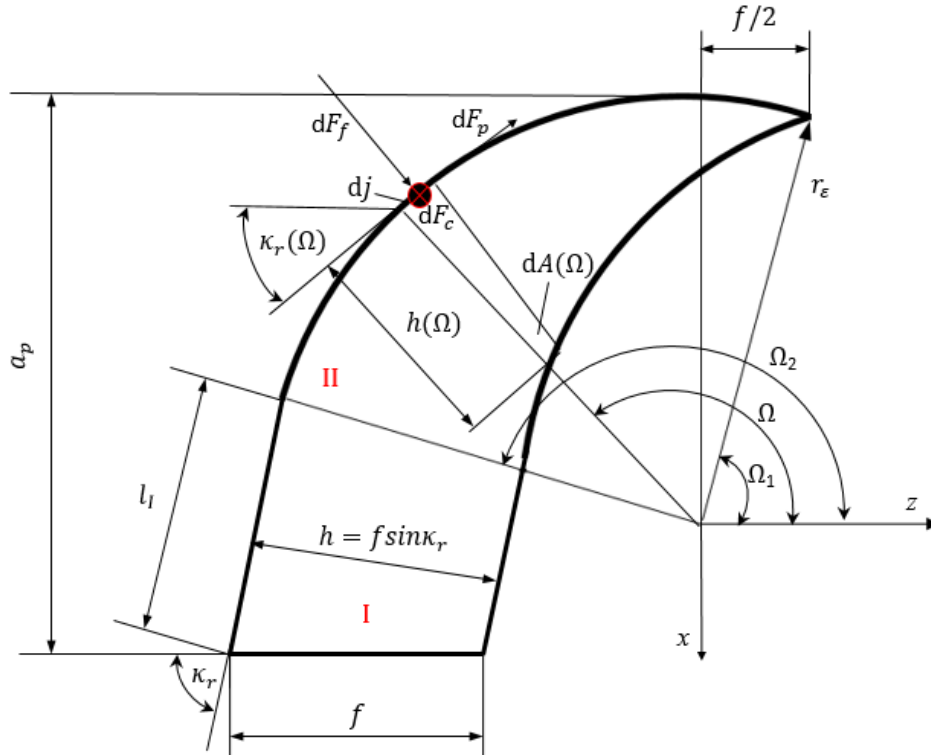
$K_{ce}$  - konstanta glavne komponente rubne sile

$K_{fe}$  - konstanta posmične komponente rubne sile

$K_{pe}$  - konstanta rubne sile prodiranja.

Geometrija poprečnog presjeka neodrezane odvojene čestice u referentnoj ravnini je prikazana na Slici 11.5.

Armaregova transformacija se primjenjuje odvojeno za segment I i II. Segment I obuhvaća ravni dio alata, a segment II obuhvaća zaobljeni vrh alata.



Slika 11.5. Geometrija poprečnog presjeka neodrezane odvojene čestice [2]

U segmentu I se debljina neodrezane odvojene čestice može izračunati prema izrazu:

$$h = f \sin \kappa_r \quad (11.15.)$$

Površina segmenta I se može odrediti prema izrazu:

$$A_I = f [a_p - r_\varepsilon (1 - \cos \kappa_r) - 0,25 f \sin(2\kappa_r)] \quad (11.16.)$$

Karakteristična duljina segmenta I se može odrediti prema izrazu:

$$l_l = \frac{1}{\sin \kappa_r} [a_p - r_\varepsilon (1 - \cos \kappa_r)] \quad (11.17.)$$

Sile koje djeluju na segment I mogu se odrediti prema izrazima:

$$F_{c,I} = K_{cc} A_I + K_{ce} l_l \quad (11.18.)$$

$$F_{f,I} = K_{fc} A_I + K_{fe} l_l \quad (11.19.)$$

$$F_{p,I} = K_{pc} A_I + K_{pe} l_l \quad (11.20.)$$

Konstante kosog rezanja ( $K_{cc}$ ,  $K_{fc}$ ,  $K_{pc}$ ) i konstante rubne sile ( $K_{ce}$ ,  $K_{fe}$ ,  $K_{pe}$ ) se mogu odrediti Aramaregovim izrazima (11.9.)-(11.14.).

Dinamometrom izmjerene sile u postupku tokarenja su u smjerovima osi  $x$ ,  $y$  i  $z$ . Projekcija sila  $F_{c,I}$ ,  $F_{f,I}$  i  $F_{p,I}$  u tim smjerovima je:

$$F_{x,I} = F_{f,I} \cos \kappa_r - F_{p,I} \sin \kappa_r \quad (11.21.)$$

$$F_{y,I} = F_{c,I} \quad (11.22.)$$

$$F_{z,I} = F_{f,I} \sin \kappa_r + F_{p,I} \cos \kappa_r \quad (11.23.)$$

Obzirom da se u segmentu II debljina neodrezane odvojene čestice kontinuirano povećava, taj segment će se podijeliti na  $i = (\Omega_2 - \Omega_1) / \Delta\Omega$  diferencijalnih elemenata.  $\Omega$  predstavlja kut položaja neodrezane odvojene čestice za razmatrani diferencijalni element te je njegova granična vrijednosti za segment II:

$$\Omega_1 = \cos^{-1} \frac{f}{2r_\varepsilon} \quad (11.24.)$$

$$\Omega_2 = 90^\circ + \kappa_r \quad (11.25.)$$

Debljina neodrezane odvojene čestice se povećava od  $h = 0$  do  $h = f \sin \kappa_r$ . Površina diferencijalnog elementa može se odrediti iz izraza:

$$dA(\Omega) = h(\Omega) dj = h(\Omega) r_\varepsilon d\Omega \quad (11.26.)$$

gdje je:

$dj$  - duljina luka inkrementa

$d\Omega$  - kut inkrementa

$h(\Omega)$  - debljine neodrezane odvojene čestice za razmatrani diferencijalni element.

Prema [181] vrijedi:

$$h(\Omega) = r_\varepsilon - f \cos \Omega - \sqrt{r_\varepsilon^2 - f^2 \sin^2 \Omega} \quad (11.27.)$$

Sile koje djeluju na diferencijalni element u segmentu II mogu se odrediti prema izrazima:

$$dF_{c,II} = K_{cc}(\Omega) dA(\Omega) + K_{ce}(\Omega) dj = [K_{cc}(\Omega) h(\Omega) + K_{ce}(\Omega)] r_\varepsilon d\Omega \quad (11.28.)$$

$$dF_{f,II} = K_{fc}(\Omega) dA(\Omega) + K_{fe}(\Omega) dj = [K_{fc}(\Omega) h(\Omega) + K_{fe}(\Omega)] r_\varepsilon d\Omega \quad (11.29.)$$

$$dF_{p,II} = K_{pc}(\Omega) dA(\Omega) + K_{pe}(\Omega) dj = [K_{pc}(\Omega) h(\Omega) + K_{pe}(\Omega)] r_\varepsilon d\Omega \quad (11.30.)$$

U segmentu II potrebno je uvesti kutove u ovisnosti o kutu položaja debljine neodrezane odvojene čestice za razmatrani diferencijalni element [2]:

$$\lambda_s(\Omega) = \text{tg}^{-1}(-\cos\Omega \text{tg}\gamma_p - \sin\Omega \text{tg}\gamma_f) \quad (11.31.)$$

$$\gamma(\Omega) = \text{tg}^{-1}\left(\cos\lambda_s(\Omega)(\sin\Omega \text{tg}\gamma_p - \cos\Omega \text{tg}\gamma_f)\right) \quad (11.32.)$$

gdje je:

$\gamma_p$  - prednji kut u ravnini  $P_p$

$\gamma_f$  - prednji kut u ravnini posmičnog gibanja  $P_f$ .

Prethodna dva kuta se mogu izračunati:

$$\text{tg}\gamma_f = \frac{\sin\kappa_r \text{tg}\gamma - \cos\kappa_r \sin\lambda_s}{\cos\lambda_s} \quad (11.33.)$$

$$\text{tg}\gamma_p = \frac{\cos\kappa_r \text{tg}\gamma + \sin\kappa_r \sin\lambda_s}{\cos\lambda_s} \quad (11.34.)$$

Ako se jednakosti  $\eta_\gamma = \lambda_s(\Omega)$  i  $\gamma = \gamma(\Omega)$  uvrste u izraze (11.9.)-(11.14.) mogu se odrediti konstante kosog rezanja te konstante komponenti rubne sile za segment II. Projekcija diferencijalnih sila u smjerovima osi  $x$ ,  $y$  i  $z$  za  $k$ -ti segment se može odrediti prema izrazima:

$$dF_{xk,II} = dF_{f,II} \sin\Omega - dF_{p,II} \cos\Omega \quad (11.35.)$$

$$dF_{yk,II} = dF_{c,II} \quad (11.36.)$$

$$dF_{zk,II} = -dF_{f,II} \cos\Omega + dF_{p,II} \sin\Omega \quad (11.37.)$$

Ukupne sile koje djeluju na segment II se mogu dobiti zbrajanjem diferencijalnih sila uzduž zakrivljenog dijela vrha alata:

$$F_{x,II} = \sum_{k=1}^i dF_{xk,II} \quad (11.38.)$$

$$F_{y,II} = \sum_{k=1}^i dF_{yk,II} \quad (11.39.)$$

$$F_{z,II} = \sum_{k=1}^i dF_{zk,II} \quad (11.40.)$$

Zbrajanjem komponenti sila u segmentu I i segmentu II se dobije ukupna sila kojom djeluje alat u postupku tokarenja:

$$F_x = F_{x,I} + F_{x,II} \quad (11.41.)$$

$$F_y = F_{y,I} + F_{y,II} \quad (11.42.)$$

$$F_z = F_{z,I} + F_{z,II} \quad (11.43.)$$

### 11.3. Eksperimentalni rad – tokarenje

U drugom dijelu eksperimentalnih ispitivanja razmatrane su komponente sile rezanja u postupku tokarenja. Druga skupina eksperimenata je provedena kako bi se ti rezultati mogli usporediti s analitičkim predviđanjima. Sredstva i uvjeti eksperimenta su prikazani u poglavlju 5.1. Dubina rezanje za sve eksperimente je  $a_p = 3$  mm, kut namještanja glavne oštrice alata je  $\kappa_r = 75^\circ$  te  $\lambda_s = 10^\circ$  i  $r_\varepsilon = 0,4$  mm. Ostali parametri su nepromijenjeni. Svaki eksperiment je ponovljen tri puta. Rezultati mjerenja su prikazani u Tablici 11.1.

Tablica 11.1. Ulazni parametri i eksperimentalni rezultati u postupku tokarenja

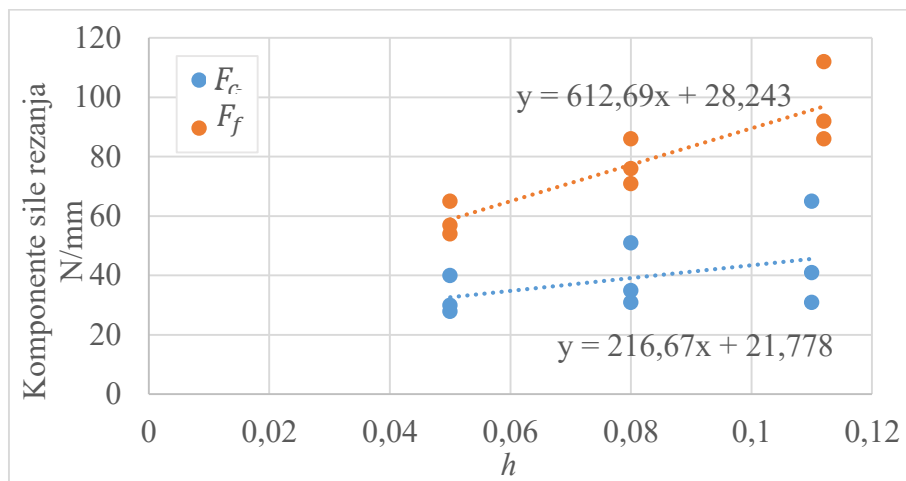
| Redni broj | $v_c$<br>m/min | $f$<br>mm/o | $F_x$<br>N | $F_y$<br>N | $F_z$<br>N |
|------------|----------------|-------------|------------|------------|------------|
| 1          | 93             | 0,05        | 10         | 216        | 135        |
| 2          | 233            | 0,05        | 9          | 164        | 102        |
| 3          | 373            | 0,05        | 5          | 154        | 87         |
| 4          | 93             | 0,08        | 8          | 273        | 167        |
| 5          | 233            | 0,08        | 2          | 218        | 131        |
| 6          | 373            | 0,08        | 1          | 210        | 109        |
| 7          | 93             | 0,11        | 9          | 394        | 252        |
| 8          | 233            | 0,11        | 8          | 257        | 154        |
| 9          | 373            | 0,11        | 16         | 248        | 124        |

### 11.4. Predviđanje sile rezanja za postupak tokarenja

Potrebne veličine iz ortogonalnog rezanja su određene na temelju rezultata numeričkih simulacija. Zatim su te veličine primijenjene u geometrijskim i kinematičkim transformacijskim modelima kako bi se predvidjele izlazne veličine postupka tokarenja. Zbog toga je ova metoda nazvana hibridna metoda.



Sile rezanja i temperatura u zoni rezanja, u usporedbi s eksperimentalnim podacima, su najbolje predviđene numeričkim modelima ortogonalnog rezanja gdje je primijenjen JCA zakon očvršćivanja. Primjenom tih rezultata (Tablica 9.6.), analitičkim postupkom su određene potrebne veličine ( $\phi$ ,  $\rho'$ ,  $\tau_{sh}$ ,  $k_{ce}$ ,  $k_{fe}$ ). Dakle, na temelju izraza (11.1.) - (11.4.) određene su konstante rubne sile,  $k_{ce} = 28$  N/mm,  $k_{fe} = 22$  N/mm, Slika 11.6. Postojanje ove sile, na temelju numeričkih simulacija u kojima je pretpostavljen oštar alat, ukazuje da rubna sila ne nastaje samo zbog zaobljenja rezne oštrice alata već zbog same prirode procesa.



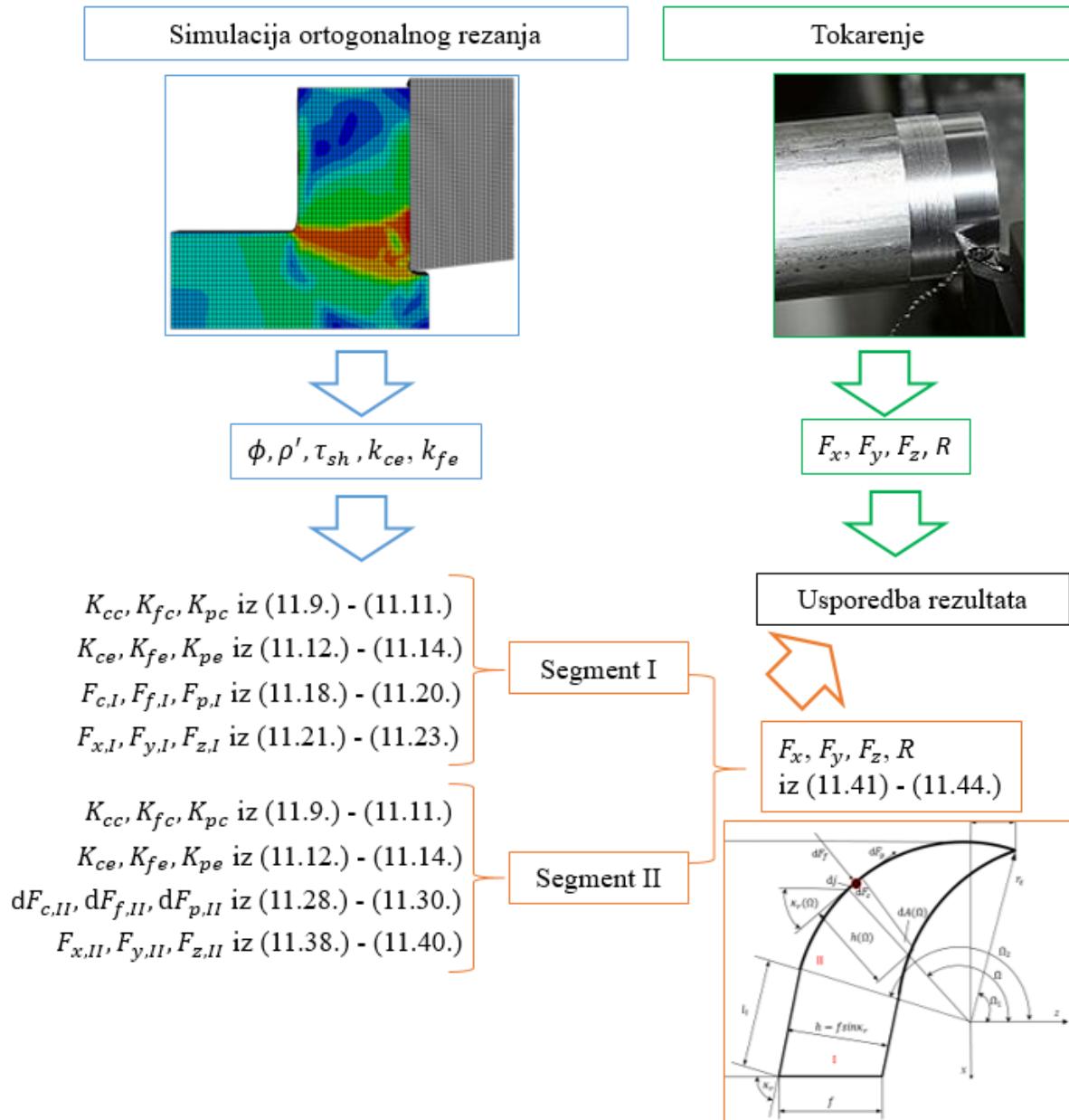
Slika 11.6. Određivanje konstanti rubne sile

Primjenom dobivenih vrijednosti konstanti rubne sile, na temelju izraza (11.1) i (11.2.) određene su komponente sile rezanja koje pridonose nastajanju odvojene čestice. Nakon toga određene su preostale potrebne veličine (izrazi 11.6.-11.8.), Tablica 11.2.

Tablica 11.2. Ulazni parametri i podaci iz ortogonalnog rezanja na temelju rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem

| Redni broj | $v_c$<br>m/min | $f$<br>mm/o | $\xi$ | $\phi$<br>° | $\rho'$<br>° | $\tau_{sh}$<br>MPa |
|------------|----------------|-------------|-------|-------------|--------------|--------------------|
| 1          | 93             | 0,05        | 3,60  | 15,52       | 25,94        | 165,04             |
| 2          | 233            | 0,05        | 3,42  | 16,30       | 15,42        | 143,63             |
| 3          | 373            | 0,05        | 3,26  | 17,05       | 12,99        | 135,47             |
| 4          | 93             | 0,08        | 2,90  | 19,03       | 26,57        | 184,91             |
| 5          | 233            | 0,08        | 2,75  | 19,98       | 15,15        | 173,72             |
| 6          | 373            | 0,08        | 2,55  | 21,41       | 11,82        | 167,69             |
| 7          | 93             | 0,11        | 2,80  | 19,65       | 27,11        | 197,65             |
| 8          | 233            | 0,11        | 2,44  | 22,86       | 16,53        | 179,32             |
| 9          | 373            | 0,11        | 2,29  | 23,59       | 8,82         | 180,27             |

Za zadane parametre rezanja i geometriju alata može se odrediti površina i karakteristična duljina segmenta I (11.15.) – (11.17.). Na temelju izraza (11.9.) – (11.11.) mogu se odrediti konstante kosog rezanja  $K_{cc}, K_{fc}, K_{pc}$  uz već naveden pretpostavke:  $\eta_\gamma = \lambda_s, \phi_n \equiv \phi, \rho_n \equiv \rho'$ . Zatim se pomoću izraza (11.18.) - (11.20.) mogu odrediti sile koje djeluju na segment I te projekcija tih sila u smjerovima osi  $x, y$  i  $z$  pomoću izraza (11.21.) - (11.23.), Slika 11.7.



Slika 11.7. Određivanje sile rezanja za postupak tokarenja; hibridna metoda

Odabrano je da se segment II podijeli na 100 diferencijalnih elemenata. Prednji kutovi  $\gamma_p$  i  $\gamma_f$  su određeni iz izraza (11.33.) i (11.34.), a  $\lambda_s(\Omega)$  i  $\gamma(\Omega)$  iz izraza (11.31.) i (11.32.). Uz pretpostavku da su parametri jednaki  $\eta_\gamma = \lambda_s(\Omega)$  i  $\gamma = \gamma(\Omega)$  mogu se odrediti konstante kosog rezanja te konstante rubne sile za segment II (11.9.) – (11.14.). Sile koje djeluju na diferencijalni element u segmentu II mogu se odrediti pomoću izraza (11.28.) - (11.30.). Projekcija tih sila u smjerovima osi  $x$ ,  $y$  i  $z$  se može odrediti pomoću izraza (11.35.) - (11.37.). Ukupna sila kojom djeluje alat je određena pomoću izraza (11.41.) - (11.43.). U postupku tokarenja sila rezanja  $R$  je rezultanta komponenti sile rezanja u smjeru osi  $x$ ,  $y$  i  $z$  te se može izračunati prema izrazu:

$$R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (11.44.)$$

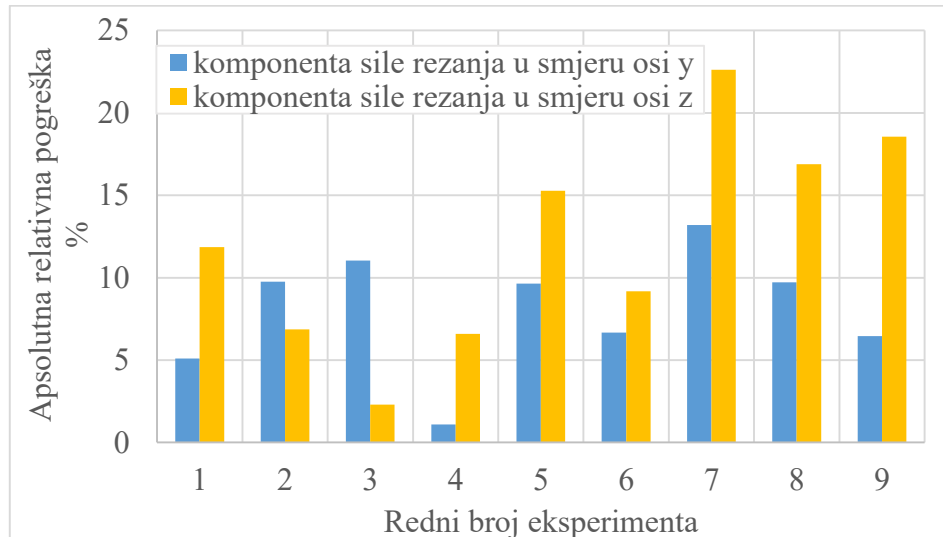
U Tablici 11.3. su prikazani eksperimentalni rezultati komponenti sile rezanja u postupku tokarenja te rezultati dobiveni hibridnom metodom. Također je prikazana relativna pogreška predviđanje sile rezanja  $R_e$  hibridnom metodom u odnosu na eksperimentalne rezultate.

Tablica 11.3. Usporedba eksperimentalnih rezultata sile rezanja i predviđanja sile rezanja hibridnom metodom za postupak tokarenja

| Redni broj | $v_c$<br>m/min | $f$<br>mm/o | Eksperimentalni rezultati |       |       |        | Rezultati dobiveni hibridnom metodom |       |       |        | $R_e$<br>% |
|------------|----------------|-------------|---------------------------|-------|-------|--------|--------------------------------------|-------|-------|--------|------------|
|            |                |             | $F_x$                     | $F_y$ | $F_z$ | $R$    | $F_x$                                | $F_y$ | $F_z$ | $R$    |            |
|            |                |             | N                         | N     | N     | N      | N                                    | N     | N     | N      |            |
| 1          | 93             | 0,05        | 10                        | 216   | 135   | 254,91 | 29                                   | 205   | 119   | 238,80 | -6,3       |
| 2          | 233            | 0,05        | 9                         | 164   | 102   | 193,34 | 19                                   | 180   | 95    | 204,42 | 5,7        |
| 3          | 373            | 0,05        | 5                         | 154   | 87    | 176,95 | 18                                   | 171   | 89    | 193,61 | 9,4        |
| 4          | 93             | 0,08        | 8                         | 273   | 167   | 320,13 | 35                                   | 270   | 156   | 313,79 | -2,0       |
| 5          | 233            | 0,08        | 2                         | 218   | 131   | 254,34 | 18                                   | 239   | 111   | 264,13 | 3,8        |
| 6          | 373            | 0,08        | 1                         | 210   | 109   | 236,61 | 2                                    | 224   | 99    | 244,91 | 3,5        |
| 7          | 93             | 0,11        | 9                         | 394   | 252   | 467,78 | 41                                   | 342   | 195   | 395,82 | -15,4      |
| 8          | 233            | 0,11        | 8                         | 257   | 154   | 299,71 | 18                                   | 282   | 128   | 310,21 | 3,5        |
| 9          | 373            | 0,11        | 16                        | 248   | 124   | 277,74 | 8                                    | 264   | 101   | 282,77 | 1,8        |

Najveća odstupanja između eksperimentalnih podataka i podataka dobivenim opisanom hibridnom metodom su za komponentu sile rezanja u smjeru osi  $x$ . Međutim, ta komponenta je i do nekoliko desetaka puta manja od komponente sile rezanja u smjeru osi  $y$  zbog čega je njen doprinos na silu rezanja skoro pa zanemariv. Eksperimentalni rezultati su u skladu s rezultatima

dobivenim hibridnom metodom za komponente sile rezanja u smjeru osi  $y$  i smjeru osi  $z$ . Navedena odstupanja su manja od 19 % za sve eksperimente osim za eksperiment pod rednim brojem sedam, Slika 11.8. Pri  $v_c = 93$  m/min i  $f = 0,11$  mm/o dolazi do nagomilavanja trakaste odvojene čestice što utječe na rezultate mjerenja. Sila rezanja (rezultantna) je dobro predviđena za sve kombinacije ulaznih parametara. Navedeno ukazuje na ispravnost primjene hibridne metode za predviđanje sile rezanja u postupku tokarenja.



Slika 11.8. Pogreška u predviđanju komponenti sile rezanja za postupak tokarenja

Numeričkim modeliranjem ortogonalnog rezanja te primjenom geometrijskih i kinematičkih transformacija mogu se eliminirati dugotrajna eksperimentalna ispitivanja. Podatke i zaključke iz ovog rada bilo bi korisno upotrijebiti za predviđanje temperature u zoni rezanja za postupak tokarenja. Također se mogu primijeniti i za predviđanje izlaznih veličina za druge postupke obrade odvajanjem čestica kao što je glodanje.

## 12. ZAKLJUČAK

U proizvodnji su sve više prisutni zahtjevi za poboljšanjem obrade odvajanjem čestica primjenom numeričkog modeliranja i optimizacije. Postupci obrade odvajanjem čestica su među najsloženijim proizvodnim postupcima za modeliranje i numeričku analizu. Složenost proizlazi iz velikih plastičnih deformacija materijala, iz triboloških uvjeta koji se javljaju na dodiru alata i obratka te zbog interakcije sustava. Također, kontinuirano nastaje odvojena čestica što je posljedica promjene naprežanja u zoni smicanja. Numerički modeli omogućuju razumijevanje pojava tijekom same obrade, ali mogućnost preciznog modeliranja obrade odvajanjem čestica ovisi o dostupnosti točnih zakona očvršćivanja materijala obratka i modela trenja te o ostalim numeričkim postavkama i parametrima koje je potrebno uzeti u obzir. Cilj ovog rada je bio definiranje pouzdanog numeričkog modela ortogonalnog rezanja te razvoj prikladnih matematičkih modela što je iskazano hipotezom:

*Konstitutivni model materijala obratka, opis uvjeta dodira između alata i obratka te diskretizacija volumena obratka i alata značajno utječu na rezultate numeričkih simulacija obrade odvajanjem čestica. Numerički model ortogonalnog rezanja temeljen na spregnutoj Euler-Lagrangeovoj formulaciji, koji pretpostavlja generiranje topline zbog trenja i plastičnih deformacija te utjecaj brzine deformacije i temperature na promjenu granice tečenja, omogućit će pouzdano predviđanje sile rezanja i temperature u zoni rezanja.*

*Višeciljnom optimizacijom matematičkih modela koji opisuju utjecaj parametara obrade na izlazne veličine procesa u postupku ortogonalnog rezanja, mogu se odrediti optimalni parametri tako da se minimiziraju sile rezanja i temperatura u zoni rezanja.*

Da bi se potvrdila navedena hipoteza, provedena je eksperimentalna i numerička analiza aluminijske legure EN AW 6082 T6. U eksperimentalnoj analizi, izravnim putem (mjerenjima), dobivene su izlazne veličine ortogonalnog rezanja. Eksperimenti su provedeni prema odabranom planu eksperimenata što je omogućilo višekriterijsko modeliranje i optimizaciju ortogonalnog rezanja. Ispitivanjem se dokazao značajan utjecaj brzine rezanja i posmaka na sile rezanja te značajan utjecaj brzine rezanja na temperaturu u zoni rezanja. Obzirom da velike sile uzrokuju ubrzano trošenje alata, pojavu podrhtavanja i povećani utrošak snage, a visoke temperature mogu uzrokovati dimenzijske pogreške obratka, fazne transformacije i ubrzano trošenje alata, optimalni parametri obrade mogu povećati produktivnost, smanjiti troškove, uštedjeti resurse i sl. Dodatna svrha eksperimentalnih

podataka je provjera točnosti rezultata dobivenih numeričkim modelima. Cilj numeričkih modela je ispravno predviđanje važnih izlaznih veličina ortogonalnog rezanja. Poznavanje sila rezanja i temperature, prije same obrade, važno je jer se na temelju njihovih vrijednosti procjenjuje potrebna snaga alatnog stroja, svojstva reznog alata, kvaliteta izratka, itd. Poznavanje ispravno predviđenih izlaznih veličina omogućuje i definiranje optimalnih parametara obrade koji su jednaki onima dobivenim na temelju eksperimentalnih podataka. Dakle, odgovarajući numerički model može značajno doprinijeti boljem razumijevanju procesa, predviđanju izlaznih veličina procesa i u konačnici određivanju optimalnih parametara obrade. Kako bi se postupak ortogonalnog rezanja primijenio i na druge postupke strojne obrade, primijenjeni su geometrijski i kinematičkih transformacijski modeli. Rezultati dobiveni hibridnom metodom su uspoređeni s eksperimentalnim mjerenjima komponenti sile rezanja u postupku tokarenja.

S obzirom na navedeno, iz ove disertacije mogu se sažeti rezultati rada navedeni u nastavku.

Matematičke modele izlaznih veličina postupka u ovisnosti o parametrima obrade dobivene na temelju eksperimentalnih podataka karakteriziraju visok stupanj adekvatnosti i pouzdanosti. Eksperimentalni rezultati sila rezanja i temperature u zoni rezanja rezultirali su pronalaženjem optimalne kombinacije ulaznih parametara. Rezultati višeciljne optimizacije predstavljaju doprinos u planiranju proizvodnog procesa. Obuhvaćena su tri kriterija: minimalna glavna sila rezanja, minimalna posmična sila i minimalna temperatura u zoni rezanja. Postupak optimizacije je proveden uporabom genetskog algoritma.

Uspješno je izrađen toplinsko-mehanički numerički model ortogonalnog rezanja legure EN AW 6082 T6 u kojem je primijenjena spregnuta Euler-Lagrangeova formulacija. Potvrđena je hipoteza da za razvoj numeričkog modela koji će previđati izlazne veličine s dovoljnom točnošću (u odnosu na eksperimentalne rezultate) potrebno je primijeniti ispravan zakon očvršćivanja, ispravno opisati uvjete dodira između alata i obratka te ispravno diskretizirati volumena obratka i alata. Različiti numerički modeli te zakoni očvršćivanja su uspoređeni u pogledu predviđanja sila rezanja i temperature u zoni rezanja. Za navedene zakone očvršćivanja razvijeni su potprogrami (VUHARD). Usporedba numeričkih predviđanja i eksperimentalnih rezultata omogućila je zaključke navedene u nastavku.

- Primjena Zorevljevog modela trenja za opis uvjeta dodira između alata i obratka je omogućila prihvatljive rezultate. Zaključeno je da se uvođenjem smične granice tečenja

koja ovisi o parametrima obrade, mogu postići poboljšanja u predviđanju glavne sile rezanja i posmične sile.

- Kako bi se ispravno predvidjela temperatura u zoni rezanja, potrebno je ispravno definirati koeficijent prijelaza topline između alata, obratka i okoline.
- Obavezna je primjena zakona očvršćivanja koji ispravno opisuje ponašanje materijala pri velikim deformacijama, brzinama deformacija i temperaturama. Johnson-Cookov, Zerilli-Armstrongov te izmijenjeni Zerilli-Armstrongov zakoni očvršćivanja ne mogu dobro opisati ponašanje materijala pri navedenim uvjetima. Na temelju podataka iz literature određene su vrijednosti parametara navedenih zakona očvršćivanja
- Razvijen je zakon očvršćivanja koji se temelji na izrazu za Johnson-Cookov zakon očvršćivanja te Arrheniusovom zakonu. Implementiranje međusobnog utjecaja temperature i brzine deformacije u navedeni zakon očvršćivanja je rezultiralo značajnim poboljšanjem u pogledu predviđanja izlaznih veličina ortogonalnog rezanja.
- Razvijen je novi zakona očvršćivanja za koji nije potrebno poznavati širinu odvojene čestice (JCA\_TANH). Primijenjeni zakon očvršćivanja može se koristiti za predviđanje komponenti sile rezanja te temperature u zoni rezanja tijekom ortogonalnog rezanja legure EN AW 6082 T6 s dovoljnom točnošću. JCA\_TANH zakon koji pretpostavlja pad naprezanja tečenja s povećanjem deformacije (nakon neke kritične vrijednosti) može realnije opisati proces odvajanjem čestica.
- Svi analizirani zakoni očvršćivanja rezultiraju istim predviđanjima: sile rezanja rastu s porastom posmaka, opadaju s porastom brzine rezanja te temperatura u zoni rezanja značajno raste s porastom brzine rezanja. Međutim, značajna je razlika u predviđanju vrijednosti izlaznih veličina primjenom različitih zakona očvršćivanja.

Također su provedena eksperimentalna ispitivanja postupka tokarenja da bi se dobile vrijednosti komponenti sile rezanja. Hibridna metoda je primijenjena kako bi se numeričkim i analitičkim postupkom predvidjela (rezultantna) sila rezanja za postupak tokarenja na temelju rezultata numeričkih modela ortogonalnog rezanja. Točnost hibridne metode je ocijenjena usporedbom eksperimentalnih rezultata i rezultata dobivenih numeričkim postupkom. Zaključeno je da su dobro previđene glavna sila rezanja i posmična sila dok je sila prodiranja lošije predviđena. Međutim, zbog njene male vrijednosti u odnosu na preostale dvije komponente sile rezanja, (rezultantna) sila rezanja je svejedno dobro predviđena.

Na temelju izloženog mogu se definirati sljedeći znanstveni doprinosi na temelju kojih se mogu postaviti neke smjernice za daljnja istraživanja.

- Na temelju eksperimentalnih rezultata određeni su optimalni parametri obrade ortogonalnog rezanja aluminijske legure EN AW 6082 T6 s ciljem smanjenja sile rezanja i temperature u zoni rezanja.
- Izrađen je numerički model ortogonalnog rezanja aluminijske legure EN AW 6082 T6 u programu za analizu metodom konačnih elemenata ABAQUS koji se temelji na spregnutoj Euler-Lagrangeovoj formulaciji. Numerički model pretpostavlja generiranje topline zbog trenja i plastičnih deformacija te utjecaj brzine deformacije i temperature na promjenu granice tečenja.
- Na temelju eksperimentalnih i numeričkih rezultata dobivena su saznanja o ponašanju materijala te uvjetima dodira alata i odvojene čestice za aluminijsku leguru EN AW 6082 T6 u uvjetima visokih temperatura i visokih brzina deformacija.
- Predložena su dva izraza za zakon očvršćivanja. Izrazi se temelje na izrazu za Johnson-Cookov zakon očvršćivanja i izrazu za Arrheniusov zakon očvršćivanja. U prvom izrazu utjecaj temperature je dodatno opisan logaritamskom funkcijom dok drugi izraz sadržava tangens hiperbolnu funkciju deformacije. Predloženi izrazi su implementirani u programski paket ABAQUS i ispitani u predviđanju postupka ortogonalnog rezanja aluminijske legure EN AW 6082 T6. Predloženim izrazima ostvarena su poboljšanja u predviđanju analiziranog postupka.
- Procijenjene su sile rezanja za postupak kosog rezanja (uzdužnog tokarenja) na temelju rezultata dobivenih numeričkim modeliranjem te transformacijskim modelima. Procijenjena je točnost hibridne metode za aluminijsku leguru EN AW 6082 T6.

Na temelju istraživanja i zaključaka predstavljenih u ovom radu smjernice za buduća istraživanja se mogu podijeliti u nekoliko različitih pravaca. Neke od ideja za daljnja istraživanja koja bi bila korisna za znanstvenu zajednicu, ali i industriju na temu obrade odvajanjem čestica aluminijskih legura su navedena u nastavku.

- Metodologija na kojoj se temelji ovaj rad može poslužiti kao osnova za analizu obrade odvajanjem čestica nekih drugih legura.
- Važno je obuhvatiti i različite parametre obrade, više naprednih geometrija i presvlaka alata te trošenje alata. Također, postoji veliki prostor za istraživanje kada se razmatra numeričko modeliranje obrade odvajanjem čestica uz primjenu sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje.



- Korisno bi bilo unaprijediti predstavljeni JCA\_TANH zakon očvršćivanja kako bi se omogućilo pouzdano predviđanje debljine odvojene čestice.
- Hibridna metoda je primijenjena za predviđanje sile rezanja za postupak tokarenja. Podatke i zaključke iz ovog rada bilo bi korisno upotrijebiti za predviđanje temperature u zoni rezanja za postupak tokarenja. Također se mogu primijeniti i za predviđanje izlaznih veličina za druge postupke obrade odvajanjem čestica, npr. glodanje.

Razvoj numeričkih modela, čija je točnost ispitana na temelju eksperimentalnih podataka, omogućuje bolje razumijevanje procesa odvajanja čestica, određivanje optimalnih ulaznih veličina što u konačnici može rezultirati redukcijom dugotrajnih i skupih eksperimentalnih istraživanja.

## LITERATURA

- [1] J. Kopac, Achievements of sustainable manufacturing by machining, *Journal of Achivements in Materials and Manufacturing Engineering*, 34, 2, 180–187, 2009.
- [2] G. Cukor, Obrada metala rezanjem, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, 2014.
- [3] D. Bajić, Tehnologija 2, predavanja, Fakultet elektrotehnike, strojastva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu, 2022.
- [4] P. J. Arrazola, T. Özel, D. Umbrello, M. Davies i I. S. Jawahir, Recent advances in modelling of metal machining processes, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62, 2, 695–718, 2013.
- [5] M. Daoud, On the characterization of Johnson-Cook constants: numerical and experimental study of high speed machining aerospace alloys, doktorski rad, École de technologie supérieure, Kanada, 2016.
- [6] B. Nedić i M. Lazić, Proizvodne tehnologije, predavanja, Mašinski fakultet Kragujevac, 2007.
- [7] A. Mitrović, Modeliranje procesa obrade rezanjem, doktorski rad, Fakultet tehničkih znanosti, Novi Sad, 2016.
- [8] N. Munjas, Računalna termoplastičnost u uvjetima velikih deformacija temeljena na višerazinskim metodama, doktorski rad, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, 2015.
- [9] G. I. Taylor i H. Quinney, The Latent Energy Remaining in a Metal after Cold Working, *Proceedings of the Royal Society A*, 1934.
- [10] P. Håkansson, M. Wallin i M. Ristinmaa, Prediction of stored energy in polycrystalline materials during cyclic loading, *International Journal of Solids and Structures*, 45, 6, 1570–1586, ožujak, 2008.
- [11] Dassault systemes, 6.13 Documentation (Abaqus), *Abaqus User's Guide*, 2013.
- [12] J. R. Caudill, Enhanced Surface Integrity With Thermally Stable Residual Stress Fields And Nanostructures In Cryogenic Processing Of Titanium Alloy Ti-6al-4v, doktorski rad, University of Kentucky, 2019.
- [13] D. Pevec, Numeričko modeliranje dinamičkih procesa deformiranja tankih bakrenih limova, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2016.
- [14] A. Ivo, *Uvod u tenzore i mehaniku kontinuuma*. Golden marketing, Zagreb, 2003.
- [15] U. S. Dixit, P. M., Dixit, *Modeling of Metal Forming and Machining Processes by Finite Element and Soft Computing Methods*. Springer, 2008.
- [16] N. Kim, *Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*. New York: Springer, 2015.
- [17] B. Boley i H. Jerome, *Theory of thermal stresses*. Courier Corporation, 2012.
- [18] G. R. Johnson i W. H. Cook, A Constitutive modeling and data for metals subjected to large strain rates and high temperatures, *Proceedings of 7th international symposium on ballistics*. 541–547, 1983.
- [19] F. J. Zerilli i R. W. Armstrong, Dislocation-mechanics-based constitutive relations for

- material dynamics calculations, *Journal of Applied Physics*, 61, 5, 1816–1825, 1987.
- [20] C. Zener i J. H. Hollomon, Effect of Strain Rate Upon Plastic Flow of Steel Contributed Original Research, *Journal of Applied Physics*, 22, 1944.
- [21] Z. Zhou, H. Gong, J. You, S. Liu i J. He, Research on compression deformation behavior of aging AA6082 aluminum alloy based on strain compensation constitutive equation and PSO-BP network model, *Materials Today Communications*, 28, lipanj, 2021.
- [22] T. Ozel, I. Llanos, J. Soriano i P. J. Arrazola, 3D finite element modelling of chip formation process for machining inconel 718: Comparison of FE software predictions, *Machining Science and Technology*, 15, 1, 21–46, 2011.
- [23] N. Kugalur-Palanisamy, E. Riviere-Lorphève, P. J. Arrazola i F. Ducobu, Comparison of Johnson-Cook and modified Johnson-Cook material constitutive models and their influence on finite element modelling of Ti6Al4V orthogonal cutting process, *AIP Conference Proceedings*, 2113, 1, 80009, srpanj, 2019.
- [24] N. Kugalur-Palanisamy, E. Rivière-Lorphève, F. Ducobu i P. J. Arrazola, Influence of the choice of the parameters on constitutive models and their effects on the results of Ti6Al4V orthogonal cutting simulation, *Procedia Manufacturing*, 47, 2019, 458–465, 2020.
- [25] M. M. Gurusamy i B. C. Rao, On the performance of modified Zerilli-Armstrong constitutive model in simulating the metal-cutting process, *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 253–265, 2017.
- [26] U. M. R. Paturi, S. K. R. Narala i R. S. Pundir, Constitutive flow stress formulation, model validation and FE cutting simulation for AA7075-T6 aluminum alloy, *Materials Science and Engineering A*, 605, 176–185, 2014.
- [27] B. Rončević, Analiza kontaktnog problema sa smanjenjem kontaktne površine. Sveučilište u Rijeci, doktorski rad, Tehnički fakultet, 2012.
- [28] S. Pervaiz, Numerical and Experimental Investigations of The Machinability of Ti6Al4V, Energy Efficiency and Sustainability Cooling/Lubrication Strategies, doktorski rad, KTH Royal Institute of Technology, 2015.
- [29] C. Shet i X. Deng, Residual stresses and strains in orthogonal metal cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43, 6, 573–587, svibanj, 2003.
- [30] H. Y. Wu, W. B. Lee, C. F. Cheung, S. To i Y. P. Chen, Computer simulation of single-point diamond turning using finite element method, *Journal of Materials Processing Technology*, 167, 2–3, 549–554, kolovoz, 2005.
- [31] K. C. Ee, O. W. Dillon i I. S. Jawahir, Finite element modeling of residual stresses in machining induced by cutting using a tool with finite edge radius, *International Journal of Mechanical Sciences*, 47, 10, 1611–1628, listopad, 2005.
- [32] Y. B. Guo i C. R. Liu, FEM analysis of mechanical state on sequentially machined surfaces, *Machining Science and Technology*, 6, 1, 21–41, 2002.
- [33] A. Hillerborg, M. Modéer i P. E. Petersson, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research*, 6, 6, 773–781, Nov. 1976.

- [34] S. Hall, E. Loukaides, S. T. Newman i A. Shokrani, Computational and experimental investigation of cutting tool geometry in machining titanium Ti-6Al-4V, *Procedia CIRP*, 86, 139–144, 2020.
- [35] A. Ramesh, C. S. Sumesh, P. M. Abhilash i S. Rakesh, Finite element modelling of orthogonal machining of hard to machine materials, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 17, 6, 543–568, 2015.
- [36] W. Saleem, M. Asad, M. Zain-ul-abdein, H. Ijaz i T. Mabrouki, Numerical investigations of optimum turning parameters—AA2024-T351 aluminum alloy, *Machining Science and Technology*, 20, 4, 634–654, 2016.
- [37] G. R. Johnson i W. H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering Fracture Mechanics*, 21, 1, 31–48, 1985.
- [38] M. Sadeghifar, R. Sedaghati, W. Jomaa i V. Songmene, A comprehensive review of finite element modeling of orthogonal machining process : chip formation and surface integrity predictions, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 3747–3791, 2018.
- [39] C. Constantin, S. M. Croitoru, G. Constantin i E. Străjescu, FEM tools for cutting process modelling and simulation, *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 74, 4, 149–162, 2012.
- [40] I. Dumanić, S. Jozić i D. Bajić, Simulation of Real Image Microstructural Model of Semi-solid Aluminium Alloy Using a Coupled Eulerian–Lagrangian Approach, *International Journal of Metalcasting*, 16, 3, 1292–1302, 2022.
- [41] E. Begović, Analiza uticaja mehaničkih karakteristika čelika na graničnu vrijednost brzine rezanja pri prijelazu iz konvencionalnog u visokobrzinsko područje obrade, doktorski rad, Mašinski fakultet, Sveučilište u Zenici, 2008.
- [42] J. Proudian, Simulating Residual Stress in Machining ; From Post Process Measurement To Pre-Process Predictions, diplomski rad, KTH Royal Institute of Technology, 2012.
- [43] T. Özel i E. Zeren, Finite element modeling the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high-speed machining, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35, 3–4, 255–267, 2007.
- [44] F. Ducobu, E. Rivière-Lorphèvre i E. Filippi, Numerical contribution to the comprehension of saw-toothed Ti6Al4V chip formation in orthogonal cutting, *International Journal of Mechanical Sciences*, 81, 77–87, travanj, 2014.
- [45] Y. Zhang, J. C. Outeiro i T. Mabrouki, On the selection of Johnson-Cook constitutive model parameters for Ti-6Al-4V using three types of numerical models of orthogonal cutting, *Procedia CIRP*, 31, 112–117, 2015.
- [46] F. Ducobu, E. Rivière-Lorphèvre i E. Filippi, Application of the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method to the modeling of orthogonal cutting, *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 59, 58–66, svibanj, 2016.
- [47] L. Zhang, Z. Cai, L. Wang, R. Zhang i H. Liu, Coupled Eulerian-Lagrangian finite element method for simulating soil-tool interaction, *Biosystems Engineering*, 175, 96–105, 2018.

- [48] M. Movahhedy, M. S. Gadala i Y. Altintas, Simulation of the orthogonal metal cutting process using an arbitrary Lagrangian-Eulerian finite-element method, *Journal of Materials Processing Technology*, 103, 2, 267–275, 2000.
- [49] F. Klocke, B. Döbbeler, B. Peng i T. Lakner, FE-simulation of the Cutting Process under Consideration of Cutting Fluid, *Procedia CIRP*, 58, 341–346, prosinac, 2017.
- [50] B. Peng, T. Bergs, F. Klocke i B. Döbbeler, An advanced FE-modeling approach to improve the prediction in machining difficult-to-cut material, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, 5–8, 2183–2196, 2019.
- [51] T. Bergs, M. Hardt i D. Schraknepper, Determination of Johnson-Cook material model parameters for AISI 1045 from orthogonal cutting tests using the Downhill-Simplex algorithm, *Procedia Manufacturing*, 48, 541–552, 2020.
- [52] A. Vovk, J. Sölter i B. Karpuschewski, Finite element simulations of the material loads and residual stresses in milling utilizing the CEL method, *Procedia CIRP*, 87, 539–544, 2020.
- [53] I. Al-Zkeri, J. Rech, T. Altan, H. Hamdi i F. Valiorgue, Optimization of the cutting edge geometry of coated carbide tools in dry turning of steels using a finite element analysis, *Machining Science and Technology*, 13, 1, 36–51, 2009.
- [54] Y. R. Ginting, B. Boswell, W. K. Biswas i M. N. Islam, Environmental Generation of Cold Air for Machining, *Procedia CIRP*, 40, 648–652, 2016.
- [55] H. Bil, S. E. Kiliç i A. E. Tekkaya, A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 9, 933–944, 2004.
- [56] L. Filice, F. Micari, S. Rizzuti i D. Umbrello, A critical analysis on the friction modelling in orthogonal machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 3–4, 709–714, 2007.
- [57] M. Binder, F. Klocke i B. Doebbler, An advanced numerical approach on tool wear simulation for tool and process design in metal cutting, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 70, 65–82, 2017.
- [58] P. Preś, W. Skoczyński i K. Jaśkiewicz, Research and modeling workpiece edge formation process during orthogonal cutting, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 4, 1–14, 2014.
- [59] M. Asad, T. Mabrouki, A. A. Memon, S. M. A. Shah i M. A. Khan, Three-dimensional finite element modeling of rough to finish down-cut milling of an aluminum alloy, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 227, 1, 75–83, 2013.
- [60] D. Umbrello, S. Caruso i S. Imbrogno, Finite element modelling of microstructural changes in dry and cryogenic machining changes in dry and cryogenic machining AISI 52100, *Materials Science and Technology*, 32, 11, 1062–1070, siječanj, 2016.
- [61] H. Wu, N. H. Duong, J. Ma i S. Lei, CEL FEM investigation of effects of microgrooved cutting tools in high speed machining of AISI 1045 steel, *12th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 1–12, Los Angeles, CA, USA, lipanj, 2017.

- [62] M. Agmell, V. Bushlya, R. M'Saoubi, O. Gutnichenko, O. Zaporozhets, S. V. Laakso i J. E. Ståhl, Investigation of mechanical and thermal loads in pcBN tooling during machining of Inconel 718, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, 3–4, 1451–1462, 2020.
- [63] Z. Pan, S. Y. Liang, H. Garmestani i D. S. Shih, Prediction of machining-induced phase transformation and grain growth of Ti-6Al-4V alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 859–866, 2016.
- [64] M. Daoud, J. F. Chatelain i A. Bouzid, Effect of rake angle on Johnson-Cook material constants and their impact on cutting process parameters of Al2024-T3 alloy machining simulation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 9–12, 1987–1997, 2015.
- [65] M. Daoud, J. F. Chatelain i A. Bouzid, Effect of rake angle-based Johnson-Cook material constants on the prediction of residual stresses and temperatures induced in Al2024-T3 machining, *International Journal of Mechanical Sciences*, 122, 392–404, 2017.
- [66] Y. Liu, D. Xu, M. Agmell, R. M. Saoubi, A. Ahadi, J. E. Stahl i J. Zhou, Numerical and experimental investigation of tool geometry effect on residual stresses in orthogonal machining of Inconel 718, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 106, srpanj, 2021.
- [67] N. Ben Moussa, H. Sidhom i C. Braham, Numerical and experimental analysis of residual stress and plastic strain distributions in machined stainless steel, *International Journal of Mechanical Sciences*, 64, 1, 82–93, 2012.
- [68] V. Schulze, H. Autenrieth, M. Deuchert i H. Weule, Investigation of surface near residual stress states after micro-cutting by finite element simulation, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59, 1, 117–120, 2010.
- [69] M. Mohammadpour, M. R. Razfar i R. Jalili Saffar, Numerical investigating the effect of machining parameters on residual stresses in orthogonal cutting, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18, 3, 378–389, 2010.
- [70] A. Muñoz-Sánchez, J. A. Canteli, J. L. Cantero i M. H. Miguélez, Numerical analysis of the tool wear effect in the machining induced residual stresses, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19, 2, 872–886, 2011.
- [71] I. Dumanić, S. Jozić, D. Bajić i M. Sučić, Experimental investigation and multi-objective optimization of controllable parameters in turning process using Taguchi Method and Grey Relational Analysis, in *Mechanical Technologies and Structural Materials*, 13–23, Split, rujan, 2018.
- [72] S. Jozić, I. Dumanić i D. Bajić, Experimental analysis and optimization of controllable parameters in turning of EN AW-2011 alloy; dry machining and alternative cooling techniques, *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 18, 1, 13–29, 2020.
- [73] R. Li and A. J. Shih, Finite element modeling of 3D turning of titanium, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29, 3–4, 253–261, 2006.
- [74] A. Tzotzis, C. García-Hernández, J. L. Huertas-Talón i P. Kyratsis, FEM based mathematical modelling of thrust force during drilling of Al7075-T6, *Mechanics and Industry*, 21, 4, 2020.

- [75] R. S. Parihar, R. K. Sahu i G. Srinivasu, Finite Element Analysis of Cutting Forces Generated in Turning Process using Deform 3D Software, *Materials Today: Proceedings*, 4, 8, 8432–8438, 2017.
- [76] T. Özel, M. Sima, A. K. Srivastava i B. Kaftanoglu, Investigations on the effects of multi-layered coated inserts in machining Ti-6Al-4V alloy with experiments and finite element simulations, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59, 1, 77–82, 2010.
- [77] M. E. Korkmaz i M. Günay, Finite Element Modelling of Cutting Forces and Power Consumption in Turning of AISI 420 Martensitic Stainless Steel, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43, 9, 4863–4870, 2018.
- [78] M. Benhassine, E. Rivière-Lorphèvre, P. J. Arrazola, P. Gobin, A. Granjon, O. Aizpuru i F. Ducobu, Finite-element simulations of Al7075-T6 orthogonal cutting: Effect of part geometry and mesh on chip morphology and formation mechanism, *AIP Conference Proceedings*, 2113, 080003:1-080003:6, 2019.
- [79] J. P. Davim, P. Reis, C. Maranhão, M. J. Jackson, G. Cabral i J. Grácio, Finite element simulation and experimental analysis of orthogonal cutting of an aluminium alloy using polycrystalline diamond tools, *International Journal of Materials and Product Technology*, 37, 1–2, 46–59, 2010.
- [80] M. Daoud, W. Jomaa, J. F. Chatelain i A. Bouzid, A machining-based methodology to identify material constitutive law for finite element simulation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77, 9–12, 2019–2033, 2015.
- [81] F. Jiang, J. Li, J. Sun, S. Zhang, Z. Wang i L. Yan, Al7050-T7451 turning simulation based on the modified power-law material model, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48, 9–12, 871–880, 2010.
- [82] T. Mabrouki, F. Girardin, M. Asad i J. F. Rigal, Numerical and experimental study of dry cutting for an aeronautic aluminium alloy (A2024-T351), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 11, 1187–1197, 2008.
- [83] H. Bil, Simulation of orthogonal metalcutting by finite element analysis, diplomski rad, Graduate school of Natural and Applied Sciences of the Middle East Technical University, 2003.
- [84] A. I. Ismail i G. U. N. Tajalla, Machining Simulation of Ti-6Al-4V Alloy Using Finite Element Method (FEM), *ICEVT 2019 - Proceeding: 6th International Conference on Electric Vehicular Technology 2019*, 119–123, 2019.
- [85] A. Singh, B. R. R. M. Chouksey i V. Pare, Finite Element Simulation of the Machining Process with Different Tool Geometries, using Lagrangian Mesh and Johnson-Cook Material Model, *Journal of Materials Science & Surface Engineering*, 5, 6, 647–652, 2017.
- [86] A. K. Parida, P. V. Rao i S. Ghosh, Influence of cutting speed and nose radius in the machining of Al-6061: FEM and experimental validation, *Materials Today: Proceedings*, 27, 2569–2573, 2019.
- [87] A. Qasim, S. Nisar, A. Shah, M. S. Khalid i M. A. Sheikh, Optimization of process parameters for machining of AISI-1045 steel using Taguchi design and ANOVA, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 59, 36–51, 2015.
- [88] R. E. Munoz, Finite Element Modelling (Including Material Grain Refinement

- Prediction) when Turning Advanced Aerospace Alloys, doktorski rad, University of Birmingham, 2014.
- [89] S. V. A. Laakso, Development of Material Models and Acquisition of Model Parameters for Metal Cutting Simulations, doktorski rad, School of Engineering Engineering Design and Production Production Engineering, Aalto University, 2015.
- [90] S. V. Laakso i E. Niemi, Using FEM simulations of cutting for evaluating the performance of different Johnson-Cook parameter sets acquired with inverse methods, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 47, 95–101, listopad, 2017.
- [91] S. V. A. Laakso i E. Niemi, Modified Johnson-Cook flow stress model with thermal softening damping for finite element modeling of cutting, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230, 2, 241–253, 2016.
- [92] F. Ducobu, P. J. Arrazola, E. Rivière-Lorphèvre i E. Filippi, On the selection of an empirical material constitutive model for the finite element modeling of Ti6Al4V orthogonal cutting, including the segmented chip formation, *International Journal of Material Forming*, 14, 3, 361–374, 2021.
- [93] F. Ducobu, E. Rivière-Lorphèvre i E. Filippi, Material constitutive model and chip separation criterion influence on the modeling of Ti6Al4V machining with experimental validation in strictly orthogonal cutting condition, *International Journal of Mechanical Sciences*, 107, 136–149, 2016.
- [94] S. M. Ebrahimi, A. Araee i M. Hadad, Investigation of the effects of constitutive law on numerical analysis of turning processes to predict the chip morphology, tool temperature i cutting force, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 10, 4245–4264, 2019.
- [95] W. Jomaa, V. Songmene i P. Bocher, An Hybrid Approach Based on Machining and Dynamic Tests Data for the Identification of Material Constitutive Equations, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25, 3, 1010–1027, 2016.
- [96] C. Bonnet, F. Valiorgue, J. Rech i H. Hamdi, Improvement of the numerical modeling in orthogonal dry cutting of an AISI 316L stainless steel by the introduction of a new friction model, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1, 2, 114–118, 2008.
- [97] A. J. Haglund, H. A. Kishawy i R. J. Rogers, An exploration of friction models for the chip-tool interface using an Arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element model, *Wear*, 265, 3–4, 452–460, 2008.
- [98] B. Haddag, S. Atlati, M. Nouari i A. Moufki, Dry machining aeronautical aluminum alloy AA2024-T351: Analysis of cutting forces, chip segmentation and built-up edge formation, *Metals*, 6, 9, 2016.
- [99] A. M. Rosli, A. S. Jamaludin, M. Nizar, M. Razali i H. Akira, Bold Approach in Finite Element Simulation on Minimum Quantity Lubrication Effect during Machining, *Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology*, 02, 33–41, ožujak, 2019.
- [100] M. R. Vaziri, M. Salimi i M. Mashayekhi, Evaluation of chip formation simulation models for material separation in the presence of damage models, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19, 2, 718–733, 2011.



- [101] M. Harzallah, T. Pottier, R. Gilblas, Y. Landon, M. Mousseigne i J. Senatore, Thermomechanical coupling investigation in Ti-6Al-4V orthogonal cutting: Experimental and numerical confrontation, *International Journal of Mechanical Sciences*, 169, 105322, 2020.
- [102] J. C. Outeiro, A. M. Dias, J. L. Lebrun i V. P. Astakhov, Machining residual stresses in AISi316L steel and their correlation with the cutting parameters, *Machining Science and Technology*, 6, 2, 251–270, kolovoz, 2006.
- [103] B. S. Sahib i K. S. Nassrullah, Experimental and Numerical Investigation of Temperature Distribution in the Cutting Zone with Different Coated Tools in Orthogonal Turning Operations, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 671, 1, 2020.
- [104] I. Uzun and K. Aslantas, Numerical simulation of orthogonal machining process using multilayer and single-layer coated tools, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54, 9–12, 899–910, 2011.
- [105] A. K. Parida, P. V. Rao i S. Ghosh, Numerical analysis and experimental investigation in the machining of AISI 316 steel, *Sadhana*, 45, 1, 2020.
- [106] L. Tang, J. Huang i L. Xie, Finite element modeling and simulation in dry hard orthogonal cutting AISI D2 tool steel with CBN cutting tool, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53, 9–12, 1167–1181, 2011.
- [107] C. Maranhão, J. P. Davim, M. J. Jackson, G. Cabral i J. Grácio, FEM machining analysis: Influence of rake angle in cutting of aluminium alloys using Polycrystalline Diamond cutting tools, *International Journal of Materials and Product Technology*, 37, 1–2, 199–213, 2010.
- [108] M. Barge, H. Hamdi, J. Rech i J. M. Bergheau, Numerical modelling of orthogonal cutting: Influence of numerical parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165, 1148–1153, 2005.
- [109] F. Ducobu, E. Rivière-Lorphèvre, M. Galindo-Fernandez, S. Ayvar-Soberanis, P. J. Arrazola i H. Ghadbeigi, Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) simulation for modelling of chip formation in AA2024-T3, *Procedia CIRP*, 82, 142–147, siječanj, 2019.
- [110] P. Kanellos, N. E. Karkalos, A. P. Markopoulos, P. Kanellos, N. E. Karkalos i A. P. Markopoulos, Numerical Simulation of Machining Using a Coupled FEM-CFD Approach, *Procedia Manufacturing*, 41, 795–802, 2020.
- [111] C. Courbon, V. Sajn, D. Kramar, J. Rech, F. Kosel i J. Kopac, Investigation of machining performance in high pressure jet assisted turning of Inconel 718 : A numerical model, *Journal of Materials Processing Tech.*, 211, 11, 1834–1851, 2011.
- [112] N. Banerjee and A. Sharma, Development of a friction model and its application in finite element analysis of minimum quantity lubrication machining of Ti-6Al-4V, *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 181–194, prosinac, 2016.
- [113] H. Hegab, H. A. Kishawy, U. Umer i A. Mohany, A model for machining with nano-additives based minimum quantity lubrication, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume*, 102, 2013–2028, siječanj, 2019.
- [114] Y. Kaynak, A. Gharibi i M. Ozkutuk, Experimental and numerical study of chip formation in orthogonal cutting of Ti-5553 alloy : the influence of cryogenic , MQL, and

- high pressure coolant supply, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 1411–1428, 2018.
- [115] M. Agmell, V. Bushlya, S. V. A. Laakso, A. Ahadi i J. E. Ståhl, Development of a simulation model to study tool loads in pcBN when machining AISI 316L, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 5–8, 2853–2865, 2018.
- [116] L. Jiao, X. Wang, Y. Qian, Z. Liang i Z. Liu, Modelling and analysis for the temperature field of the machined surface in the face milling of aluminium alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 9–12, 1797–1808, 2015.
- [117] S. Pervaiz, I. Deiab, E. Wahba, A. Rashid i M. Nicolescu, A numerical and experimental study to investigate convective heat transfer and associated cutting temperature distribution in single point turning, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 1–4, 897–910, 2018.
- [118] F. Akbar, P. T. Mativenga i M. A. Sheikh, An experimental and coupled thermo-mechanical finite element study of heat partition effects in machining, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46, 5–8, 491–507, 2010.
- [119] A. M. Abdelhafeez, S. L. Soo, D. Aspinwall, A. Dowson i D. Arnold, A Coupled Eulerian Lagrangian Finite Element Model of Drilling Titanium and Aluminium Alloys, *SAE International Journal of Aerospace*, 9, 1, 198–207, 2016.
- [120] M. Saez-De-Buruaga, J. A. Esnaola, P. Aristimuno, D. Soler, T. Björk i P. J. Arrazola, A Coupled Eulerian Lagrangian Model to Predict Fundamental Process Variables and Wear Rate on Ferrite-pearlite Steels, *Procedia CIRP*, 58, 251–256, 2017.
- [121] F. Shuang, X. Chen i W. Ma, Numerical analysis of chip formation mechanisms in orthogonal cutting of Ti6Al4V alloy based on a CEL model, *International Journal of Material Forming*, 11, 2, 185–198, 2018.
- [122] M. Abouridouane, G. Laschet, V. Kripak, J. Dierdori, U. Prah, G. Wirtz i T. Bergs, Microstructure-based approach to predict the machinability of the ferritic-pearlitic by cutting operations approach to predict the machinability of C60 by cutting operations, *Procedia CIRP*, 82, 107–112, 2019.
- [123] Y. Gao, J. H. Ko i H. P. Lee, 3D coupled Eulerian-Lagrangian finite element analysis of end milling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98, 1–4, 849–857, 2018.
- [124] Y. Gao, J. H. Ko i H. P. Lee, Meso-scale tool breakage prediction based on finite element stress analysis for shoulder milling of hardened steel, *Journal of Manufacturing Processes*, 55, 31–40, srpanj, 2020.
- [125] A. Afsharhanaei, P. Parenti i M. Annoni, Coupled Eulerian-Lagrangian technique for microcutting FE-modelling of AISI1045 steel, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 21, 3, 169–186, 2019.
- [126] S. Berezvai, T. G. Molnar, A. Kossa, D. Bachrathy i G. Stepan, Numerical and experimental investigation of contact length during orthogonal cutting, *Materials Today: Proceedings*, 12, 329–334, 2019.
- [127] C. Dimopoulos, N. E. Karkalos, J. Kundrák i A. P. Markopoulos, Combination of an improved 3d geometry and coupled eulerian-lagrangian formulation for turning simulation, *Materials Science Forum*, 994, 240–247, 2020.

- [128] F. Ducobu, P. J. Arrazola, E. Rivière-Lorphèvre, G. O. De Zarate, A. Madariaga i E. Filippi, The CEL Method as an Alternative to the Current Modelling Approaches for Ti6Al4V Orthogonal Cutting Simulation, *Procedia CIRP*, 58, 245–250, 2017.
- [129] F. Ducobu, E. Rivière-Lorphèvre i E. Filippi, On the importance of the choice of the parameters of the Johnson-Cook constitutive model and their influence on the results of a Ti6Al4V orthogonal cutting model, *International Journal of Mechanical Sciences*, 122, 143–155, 2017.
- [130] F. Ducobu, E. Rivière-Lorphèvre i E. Filippi, Mesh influence in orthogonal cutting modelling with the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method, *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 65, 324–335, 2017.
- [131] F. Ducobu, E. Rivière-Lorphèvre i E. Filippi, Finite element modelling of 3D orthogonal cutting experimental tests with the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) formulation, *Finite Elements in Analysis and Design*, 134, 15, 27–40, listopad, 2017.
- [132] Y. Liu, A. Hrechuk, M. Agmell, A. Ahadi, J. E. Stahl i J. Zhou, FE analysis on the association between tool edge radius and thermal-mechanical load in machining Inconel 718, *Procedia CIRP*, 102, 91–96, 2021.
- [133] D. Xu, L. Ding, Y. Liu, J. Zhou i Z. Liao, Investigation of the influence of tool rake angles on machining of inconel 718, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5, 3, 2021.
- [134] D. Schraknepper, B. Peng i T. Bergs, Advanced calculation of the stress distribution in milling tools during cutting under consideration of residual stresses and tool wear, *Procedia CIRP*, 102, 2019, 19–24, 2021.
- [135] G. Liu, D. Zhang i C. Yao, A modified constitutive model coupled with microstructure evolution incremental model for machining of titanium alloy Ti–6Al–4V, *Journal of Materials Processing Technology*, 297, 117262, lipanj, 2021.
- [136] X. Xu, J. Outeiro, J. Zhang, B. Xu, W. Zhao i V. Astakhov, Machining simulation of Ti6Al4V using coupled Eulerian-Lagrangian approach and a constitutive model considering the state of stress, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 110, 102312, ožujak, 2021.
- [137] J. Priest, H. Ghadbeigi, S. Avar-Soberanis i S. Gerardis, 3D finite element modelling of drilling: The effect of modelling method, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 35, 158–168, 2021.
- [138] H. Khochtali, I. BenBelgacem, F. Zemzemi i W. Bensalem, Comparison of Coupled Eulerian–Lagrangian and Coupled Smoothed Particle Hydrodynamics–Lagrangian in Fluid–Structure Interaction Applied to Metal Cutting, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46, 12, 11923–11936, 2021.
- [139] C. Zhang and H. Choi, Study of segmented chip formation in cutting of high-strength lightweight alloys, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 9–10, 2683–2703, 2021.
- [140] B. Zhou, W. Zhang, Z. Gao i G. Luo, Machining-Induced Work Hardening Behavior of Inconel 718 Considering Edge Geometries, *Materials*, 15, 2, siječanj, 2022.
- [141] L. Chaabani, R. Piquard, R. Abnay, M. Fontaine, A. Gilbin, P. Picart, S. Thibaud, A. D’acunto i D. Dudzinski, Study of the Influence of Cutting Edge on Micro Cutting of

- Hardened Steel Using FE and SPH Modeling, *Micromachines*, 13, 7, 2022.
- [142] Y. Liu, J. Weng, R. M'saoubi, A. Ahadi i J. Zhou, Evolution of residual stress when turning a fillet radius in stainless steel, *Journal of Manufacturing Processes*, 85, 2022, 216–226, svibanj, 2023.
- [143] I. Duplančić and N. Krnić, *Materijali 3*. 2009.
- [144] W. Moćko, J. Janiszewski, J. Radziejewska i M. Grazka, Analysis of deformation history and damage initiation for 6082-T6 aluminium alloy loaded at classic and symmetric Taylor impact test conditions, *International Journal of Impact Engineering*, 75, 203–213, 2015.
- [145] L. Alco Metals, *Aluminium Alloy 6082 - T6~T651 Plate*. 2013.
- [146] I. Pavlič, *Statistička teorija i primjena*. Zagreb: Tehnička knjiga, 1970.
- [147] S. Jozić, Višeparametarsko modeliranje i optimiranje tvrdog glodanja, doktorski rad, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu, 2012.
- [148] B. Bauer, Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2006.
- [149] A. H. Adibi-Sedeh, V. Madhavan i B. Bahr, Extension of Oxley's analysis of machining to use different materials models, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 125, 4, 656–666, 2003.
- [150] X. Chen, Y. Peng, S. Peng, S. Yao, C. Chen i P. Xu, Flow and fracture behavior of aluminum alloy 6082-T6 at different tensile strain rates and triaxialities, *PLoS ONE*, 12, 7, 1–28, 2017.
- [151] M. Rodríguez-Millán, A. Vaz-Romero, A. Rusinek, J. A. Rodríguez-Martínez i A. Arias, Experimental Study on the Perforation Process of 5754-H111 and 6082-T6 Aluminium Plates Subjected to Normal Impact by Conical, Hemispherical and Blunt Projectiles, *Experimental Mechanics*, 54, 5, 729–742, 2014.
- [152] Y. Karpat, Temperature dependent flow softening of titanium alloy Ti6Al4V: An investigation using finite element simulation of machining, *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 4, 737–749, 2011.
- [153] E. Ozlu, E. Budak i A. Molinari, Analytical and experimental investigation of rake contact and friction behavior in metal cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49, 11, 865–875, 2009.
- [154] M. K. Medaska, L. Nowag i S. Y. Liang, Simultaneous measurement of the thermal and tribological effects of cutting fluid, *Machining Science and Technology*, 3, 2, 221–237, 1999.
- [155] I. Dumanić, S. Jozić, P. Bagavac i D. Bajić, Orthogonal cutting simulation of EN AW 6082 T6 alloy using a coupled Eulerian-Lagrangian approach, *Heliyon*, ožujak, 2023.
- [156] G. Li, M. Liu i S. Zhao, Reduced computational time in 3D finite element simulation of high speed milling of 6061-T6 aluminum alloy, *Machining Science and Technology*, 25, 4, 558–584, 2021.
- [157] M. Rodriguez-Millan, D. Garcia-Gonzalez, A. Rusinek i A. Arias, Influence of stress state on the mechanical impact and deformation behaviors of aluminum alloys, *Metals*,

- 8, 7, 2018.
- [158] S. A. Iqbal, P. T. Mativenga i M. A. Sheikh, An investigative study of the interface heat transfer coefficient for finite element modelling of high-speed machining, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222, 11, 1405–1416, 2008.
- [159] S. P. F. C. Jaspers i J. H. Dautzenberg, Material behaviour in conditions similar to metal cutting: Flow stress in the primary shear zone, *Journal of Materials Processing Technology*, 122, 2–3, 322–330, 2002.
- [160] T. Li, B. Zhao, X. Lu, H. Xu i D. Zou, A Comparative Study on Johnson Cook, Modified Zerilli–Armstrong and Arrhenius-Type Constitutive Models to Predict Compression Flow Behavior of SnSbCu Alloy, *Materials*, 2019.
- [161] P. L. Wang, H. T. Jiang, R. J. Zhang i S. Y. Huang, Study of hot deformation behavior of 6082 aluminum alloy, *Materials Science Forum*, 877, 340–346, 2017.
- [162] S. S. Panicker, K. S. Prasad, S. Basak i S. K. Panda, Constitutive Behavior and Deep Drawability of Three Aluminum Alloys Under Different Temperatures and Deformation Speeds, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26, 8, 3954–3969, 2017.
- [163] I. Schindler, P. Kawulok, V. Očenášek, P. Opěla, S. Rusz i R. Kawulok, Flow stress and hot deformation activation energy of 6082 aluminium alloy influenced by initial structural state, *Metals*, 9, 12, 2019.
- [164] X. Qian, N. Parson i X. G. Chen, Effects of Mn addition and related Mn-containing dispersoids on the hot deformation behavior of 6082 aluminum alloys, *Materials Science and Engineering A*, 764, 9, 138253, rujan, 2019.
- [165] Q. Zhang, X. Huang, R. Guo i D. Chen, Thermal Creep Behavior and Creep Crystallization of Al-Mg-Si Aluminum Alloys, *Materials*, 15, 22, 2022.
- [166] N. K. Palanisamy, E. R. Lorphèvre, P. J. Arrazola i F. Ducobu, Influence of constitutive models and the choice of the parameters on fe simulation of ti6al4v orthogonal cutting process for different uncut chip thicknesses, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5, 2, 2021.
- [167] M. Calamaz, D. Coupard i F. Girot, A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, 3–4, 275–288, 2008.
- [168] M. E. Kassner and R. Ermagan, Strain softening of aluminum in shear at elevated temperature, *Materials Science Forum*, 941 MSF, 1490–1494, listopad, 2018.
- [169] M. E. Kassner and R. Ermagan, Strain softening of aluminum in shear at elevated temperature: Influence of Dislocation Climb, *Trans Tech Publications Ltd*, 941, 1490–1494, 2018.
- [170] M. Sima i T. Özel, Modified material constitutive models for serrated chip formation simulations and experimental validation in machining of titanium alloy Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50, 11, 943–960, 2010.
- [171] M. Calamaz, D. Coupard i F. Girot, Numerical simulation of titanium alloy dry machining with a strain softening constitutive law, *Machining Science and Technology*, 14, 2, 244–257, 2010.

- 
- [172] X. Hou, Z. Liu, B. Wang, W. Lv, X. Liang i Y. Hua, Stress-strain curves and modified material constitutive model for Ti-6Al-4V over the wide ranges of strain rate and temperature, *Materials*, 11, 6, 2018.
- [173] Y. Altintas, *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- [174] L. V. Colwell, Predicting the angle of chip flow for single point cutting tools, *Journal of Engineering for Industry*, 76, 199–204, 1954.
- [175] P. L. B. Young, H. T., Mathew, P., Oxley, Allowing for nose radius effects in predicting the chip flow direction and cutting forces in bar turning, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 201, 213–226, 1987.
- [176] J. Wang i P. Mathew, Development of a general tool model for turning operations based on a variable flow stress theory, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35, 1, 71–90, siječanj, 1995.
- [177] E. J. A. Armarego, The Unified-Generalized Mechanics of Cutting Approach – A Step Towards a House of Predictive Performance Models for Machining Operations, *Machining Science and Technology*, 4, 319–362, 2000.
- [178] ISO: International Organization for Standardization – Standard 3002/1-1982 Basic Quantities in Cutting and Grinding – Part I & II, 1982.
- [179] ISO: International Organization for Standardization – Standard 13399-1:2006 Cutting Tool Data Representation and Exchange – Part I, 2006.
- [180] G. V. Stabler, The Chip Flow Law and Its Consequences, *5th International MTDR Conference*, 5, 243–251, srpanj, 1964.
- [181] J. Wang, Development of a chip flow model for turning operations, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41, 9, 1265–1274, srpanj, 2001.

## PRILOZI

### PRILOG A

U nastavku je prikazan potprogram VUHARD napisan u programskom paketu FORTRAN za Johnson-Cookov zakon očvršćivanja. Potprogram mora sadržavati funkciju koja predstavlja Johnson-Cookov zakon očvršćivanja (izraz (3.49.)) te parcijalne derivacije naprezanja tečenja po ekvivalentnoj plastičnoj deformaciji, brzini ekvivalentne plastične deformacije i temperaturi (izrazi (9.1.), (9.2.), (9.3.)).

Da bi se potprogram mogao ispravno povezati, potrebno je u glavnom programu (.inp dokument) ispravnim redoslijedom definirati parametre određenog zakona očvršćivanja te početne uvjete:

```
*Material, name=MATERIAL-JC_vuh
*Conductivity
180.,
*Density
2.7e-09,
*Elastic
70000., 0.33
*Expansion
2.4e-05,
*Inelastic Heat Fraction
0.9,
*Plastic, hardening=USER, properties=8
201.5, 250.87, 0.206, 0.00977, 1.31, 0.001, 298., 855.
*Specific Heat
9.2e+08,
**
** PREDEFINED FIELDS
**
** Name: Field-1 Type: Temperature
*Initial Conditions, type=TEMPERATURE
SET-11, 293.
```

```

C
C Funkcija - Johnson-Cook zakon ocvrscivanja
C
C     function JC (
C Parameteri
C     1 epsp, depsp, T,
C Konstante JC zakona ocvrscivanja
C     2 A, B, C, n, m, depsp0, T0, Tm )
C     include 'vaba_param.inc'
C ocvrscivanje uslijed plasticnih deformacija - prva zagrada
C     prvi_dio = A + B * epsp**n
C utjecaj brzine deformacije
C     if (depsp .gt. depsp0) then
C         drugi_dio= 1.0 + C * log (depsp/depsp0)
C     else
C         drugi_dio= 1.0
C     end if
C utjecaj temperature if T0 < temperatura < Tm
C     treci_dio = 1.0
C     if (T > T0) then
C         if (T < Tm) then
C             treci_dio = 1.0 - ((temp - T0) / (Tm - T0))**m
C         else
C             treci_dio = 0.0
C         end if
C     end if
C JC ukupno
C     JC = prvi_dio * drugi_dio* treci_dio
C     return
C     end
C
C
C Derivacija JC / epsp
C
C     function JC_epsp (
C     1 epsp, depsp, T,
C     2 A, B, C, n, m, depsp0, T0, Tm )
C     include 'vaba_param.inc'
C ocvrscivanje uslijed plasticnih deformacija - prva zagrada
C     prvi_dio = n * B * (epsp**(n - 1.0))
C utjecaj brzine deformacije
C     if (depsp .gt. depsp0) then
C         prvi_dio = prvi_dio * (1.0 + C * log (depsp/depsp0))
C     end if
C utjecaj temperature if T0 < temperatura < Tm
C     treci_dio = 1.0
C     if (T > T0) then
C         if (T < Tm) then
C             treci_dio = 1.0 - ((T - T0) / (Tm - T0))**m
C         else
C             treci_dio = 0.0
C         end if
C     end if
C     JC_epsp = prvi_dio * treci_dio
C     return
C     end

```



```

C
C
C Derivacija JC / epsp
C
function JC_Depsp (
1 epsp, depsp, T,
2 A, B, C, n, m, depsp0, T0, Tm )
  include 'vaba_param.inc'
C oscvrscivanje uslijed plasticnih deformacija - prva zagrada
  prvi_dio = 0.0
C utjecaj brzine deformacije
  if (depsp .gt. depsp0) then
    prvi_dio = (A + B * epsp**n) * C / depsp
  end if
C utjecaj temperature if T0 < temperatura < Tm
  treci_dio = 1.0
  if (T > T0) then
    if (T < Tm) then
      treci_dio = 1.0 - ((T - T0) / (Tm - T0))**m
    else
      treci_dio = 0.0
    end if
  end if
  JC_Depsp = prvi_dio * treci_dio
  return
end

C
C
C Derivacija JC / T
C
function JC_T(
1 epsp, depsp, T,
2 A, B, C, n, m, depsp0, T0, Tm )
  include 'vaba_param.inc'
C oscvrscivanje uslijed plasticnih deformacija - prva zagrada
  prvi_dio = A + B * epsp**n
C utjecaj brzine deformacije
  if (depsp .gt. depsp0) then
    drugi_dio= 1.0 + C * log (depsp/depsp0)
  else
    drugi_dio= 1.0
  end if
C utjecaj temperature if T0 < temperatura < Tm
  treci_dio = 0.0
  if (T > T0 .and. T < Tm) then
    treci_dio = -m*(((T - T0)/(Tm - T0))**(m))
1 / (T - T0)
  end if
  JC_T= prvi_dio * drugi_dio* treci_dio
  return
end

```

```

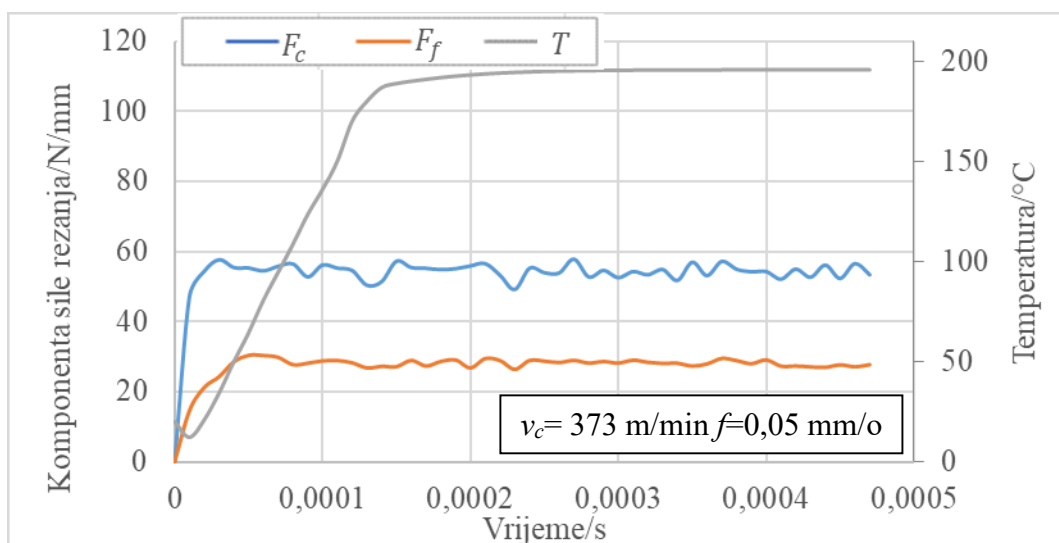
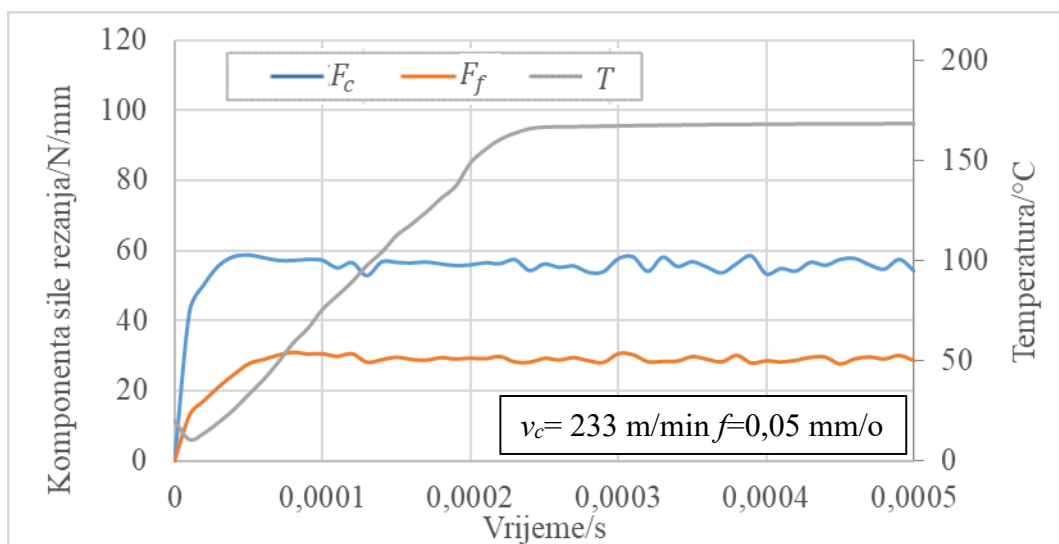
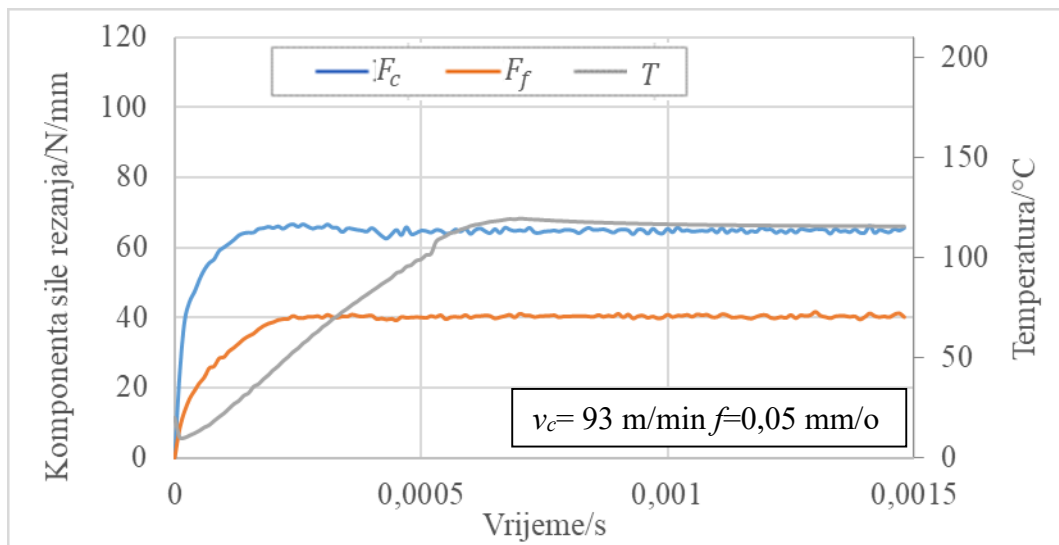
C VUHARD_glavno
C
C      subroutine vuhard (
1      nblock,
2      nElement, nIntPt, nLayer, nSecPt,
3      lAnneal, stepTime, totalTime, dt, cmname,
4      nstatev, nfieldv, nprops,
5      props, tempOld, tempNew, fieldOld, fieldNew,
6      stateOld,
7      eqps, eqpsRate,
8      yield, dyieldDtemp, dyieldDeqps,
9      stateNew )
C
C      include 'vaba_param.inc'
C
C      dimension nElement(nblock),
1      props(nprops),
2      tempOld(nblock),
3      fieldOld(nblock,nfieldv),
4      stateOld(nblock,nstatev),
5      tempNew(nblock),
6      fieldNew(nblock,nfieldv),
7      eqps(nblock),
8      eqpsRate(nblock),
9      yield(nblock),
1     dyieldDtemp(nblock),
2     dyieldDeqps(nblock,2),
3     stateNew(nblock,nstatev)
C
C      character*80 cmname
C
C      A = props(1)
C      B = props(2)
C      n = props(3)
C      C = props(4)
C      m = props(5)
C      dejsp0 = props(6)
C      T0 = props(7)
C      Tm = props(8)
C
C

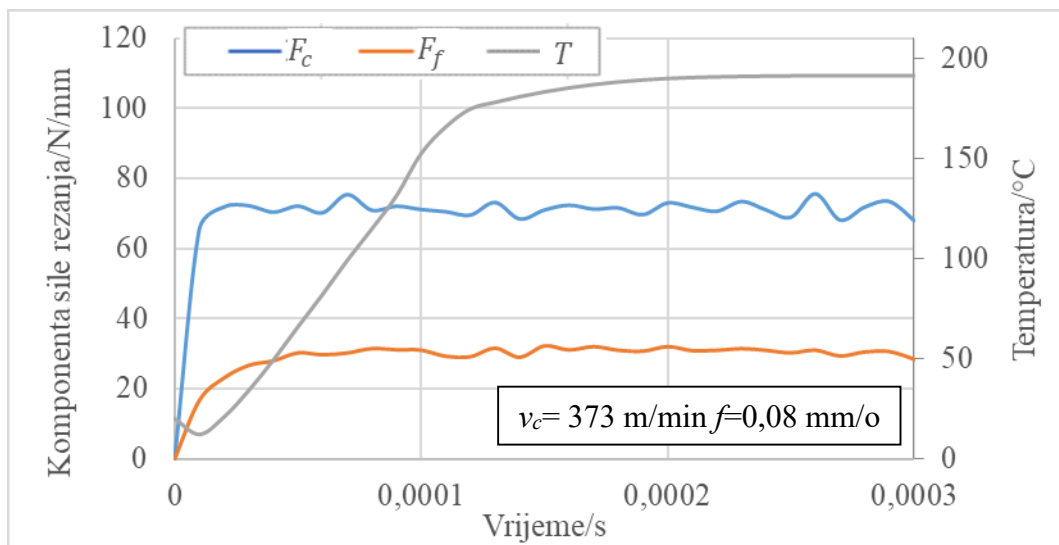
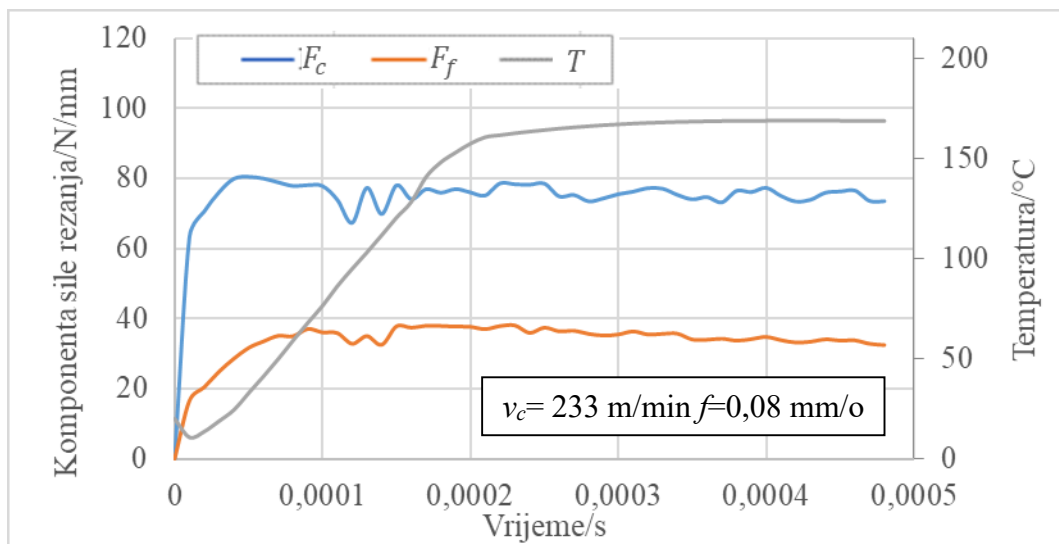
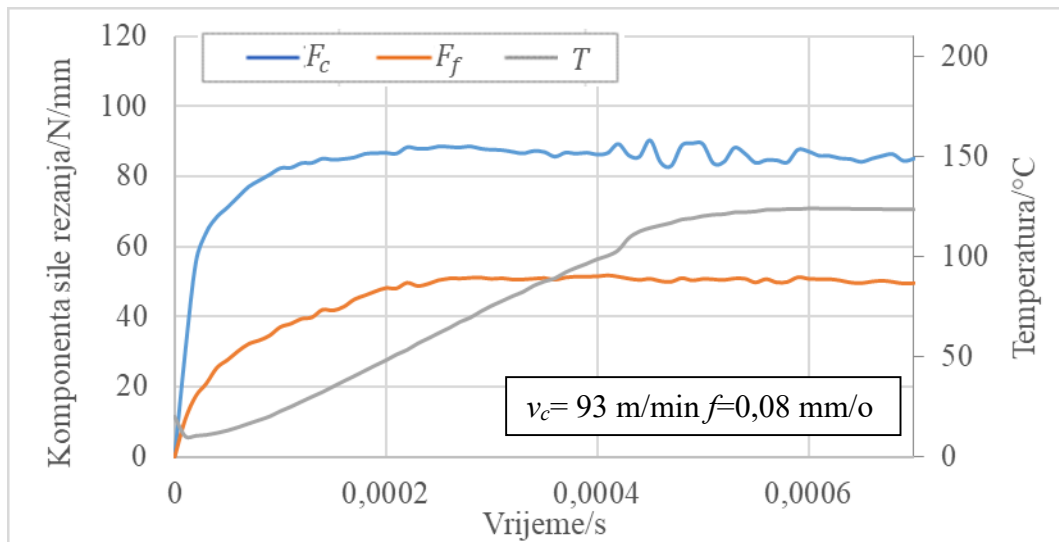
```

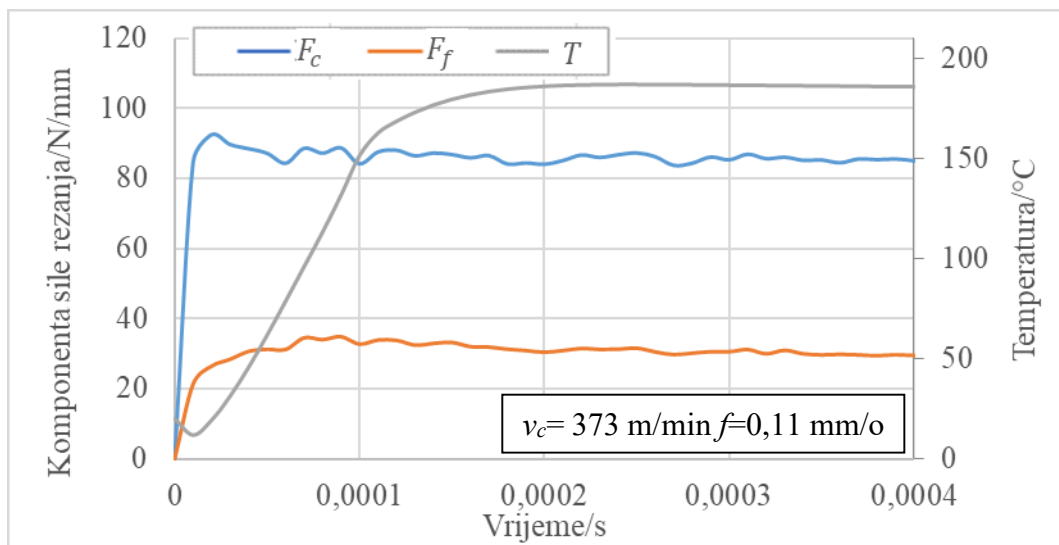
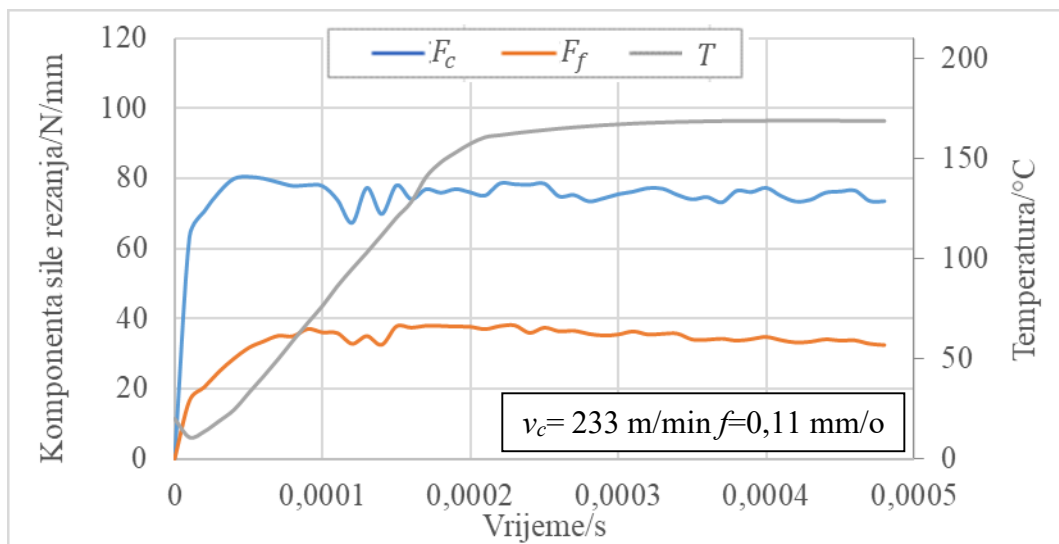
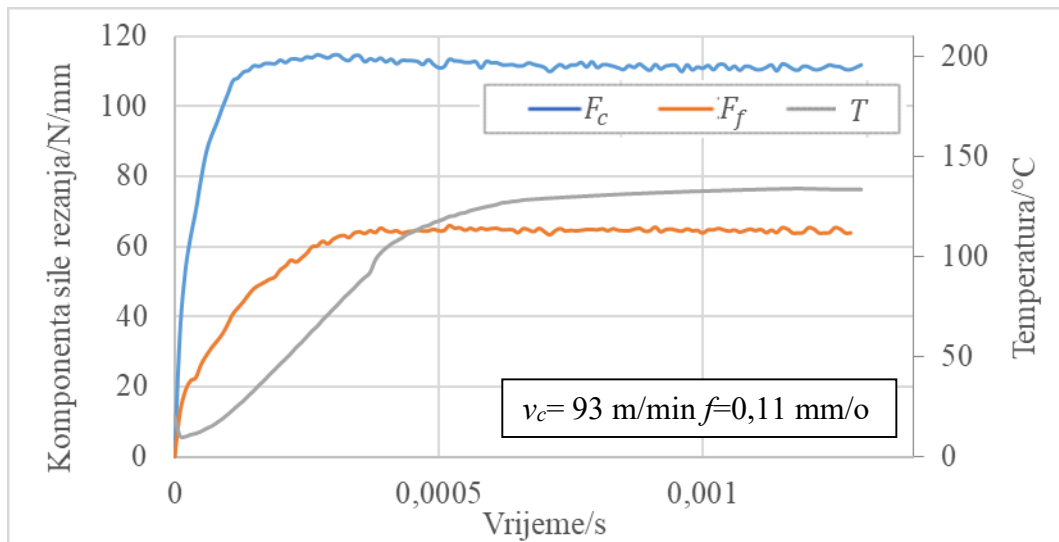
```
do k = 1, nblock
  epsp = eqps(k)
  depsp = eqpsRate(k)
  T = tempNew(k)
C JC
  Yield(k) = JC(epsp, depsp, T,
  1 A, B, C, n, m, depsp0, T0, Tm)
C JC/ epsp
  dyieldDeqps(k,1) = JC_epsp(epsp, depsp, T,
  1 A, B, C, n, m, depsp0, T0, Tm)
C JC / depsp
  dyieldDeqps(k,2) = JC_Depsp(epsp, depsp, T,
  1 A, B, C, n, m, depsp0, T0, Tm)
C JC/ T
  dyieldDtemp(k) = JC_T(epsp, depsp, T,
  1 A, B, C, n, m, depsp0, T0, Tm)
end do
C
  return
end
```

## PRILOG B

U nastavku su prikazani rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem ortogonalnog rezanja te primjenom JCA zakona očvršćivanja.

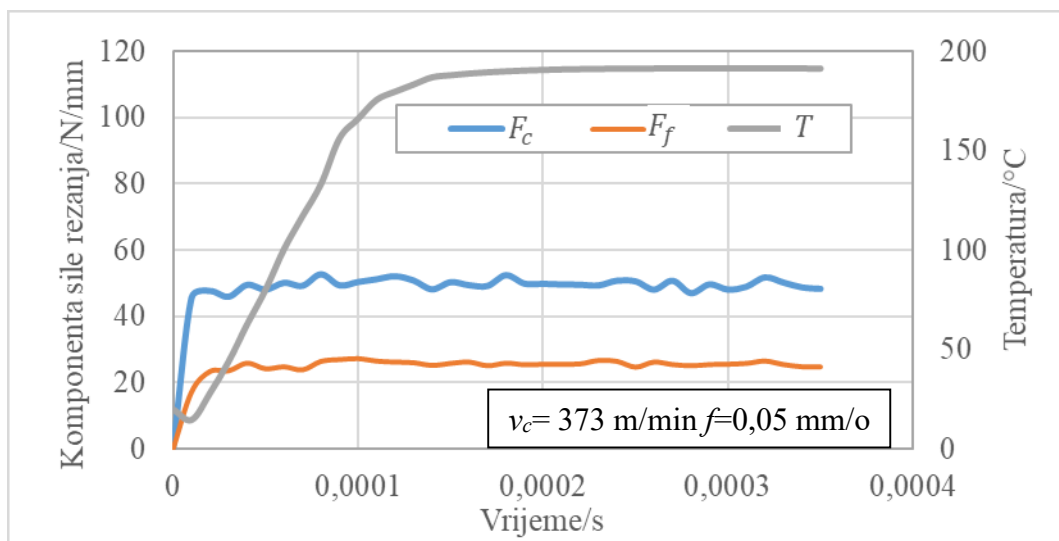
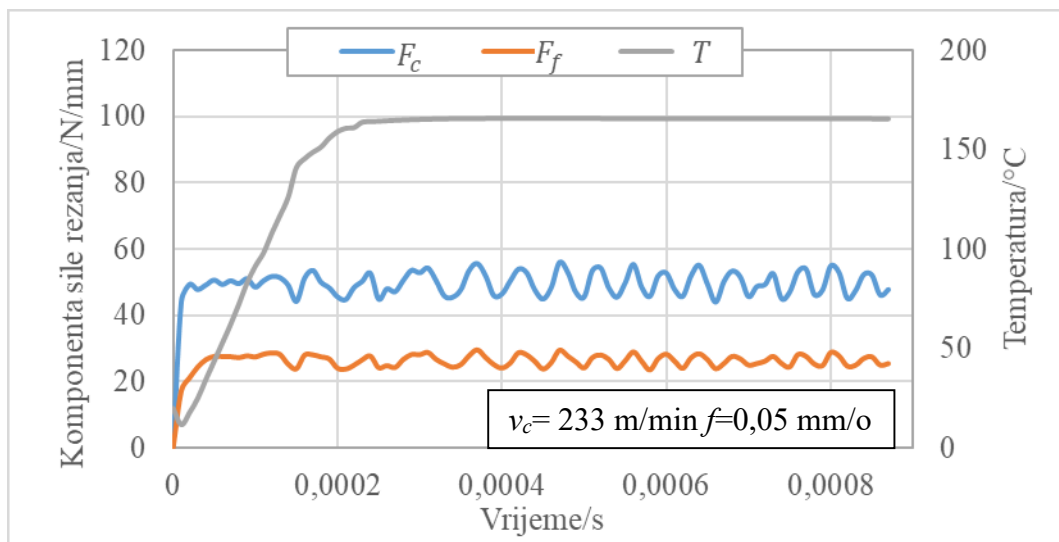
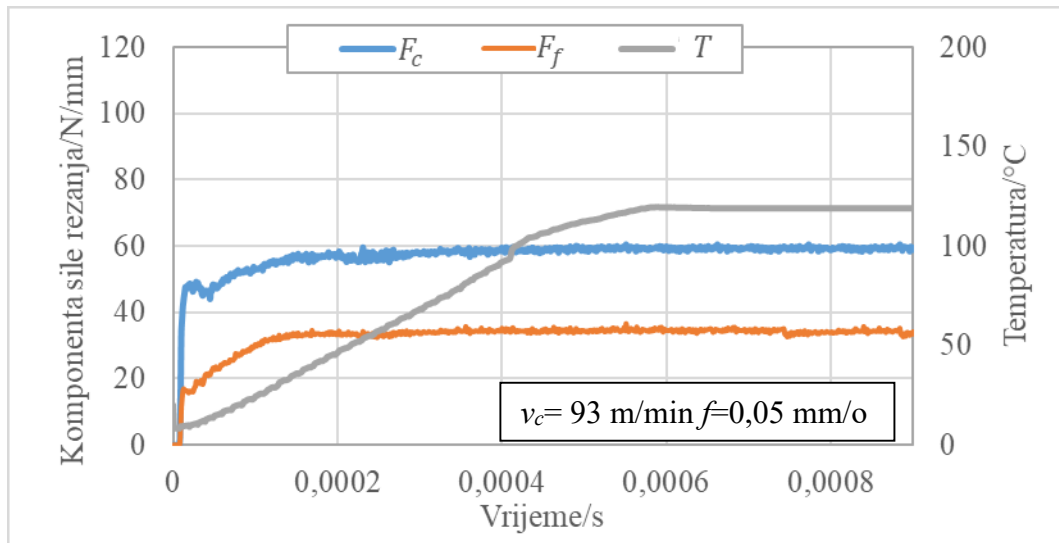


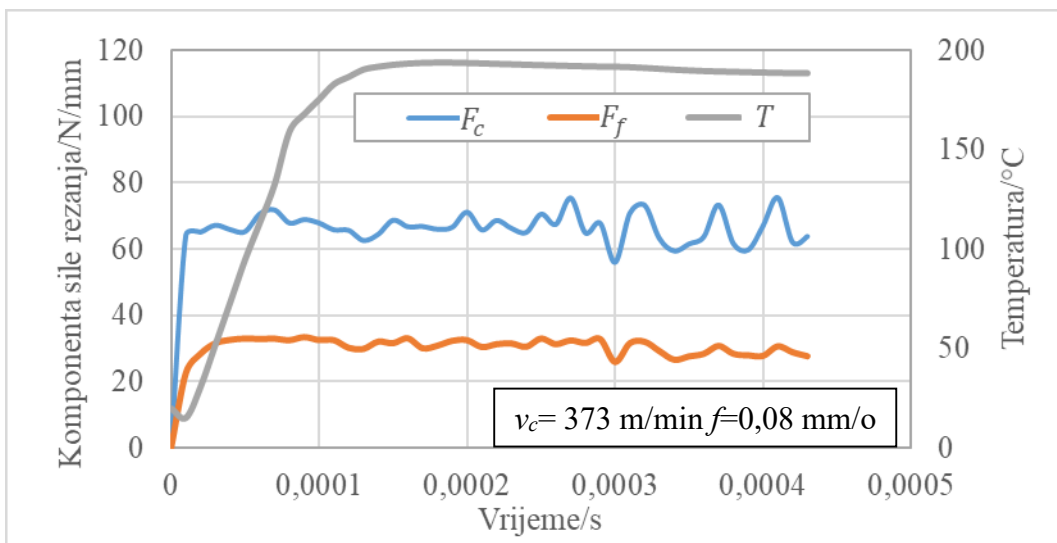
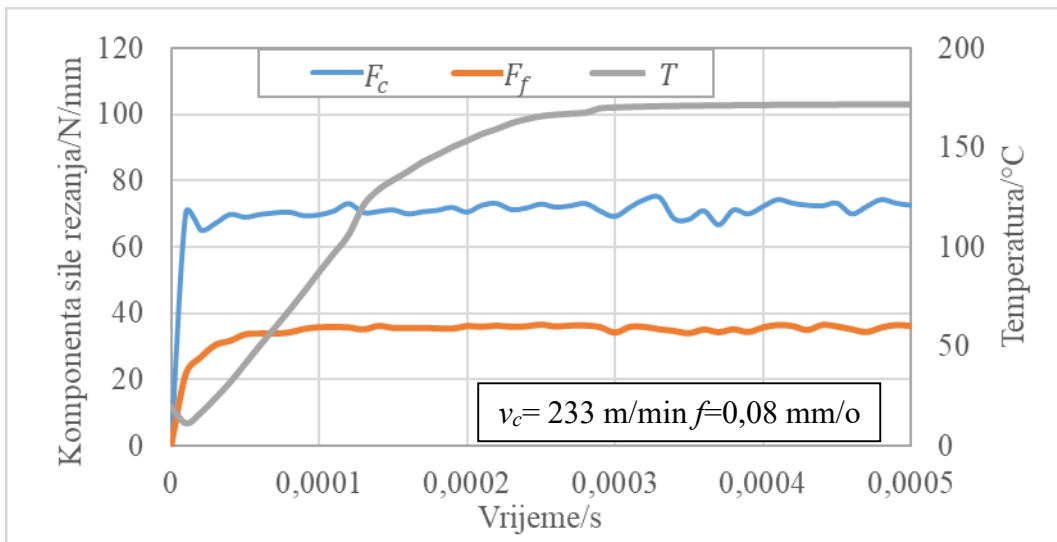
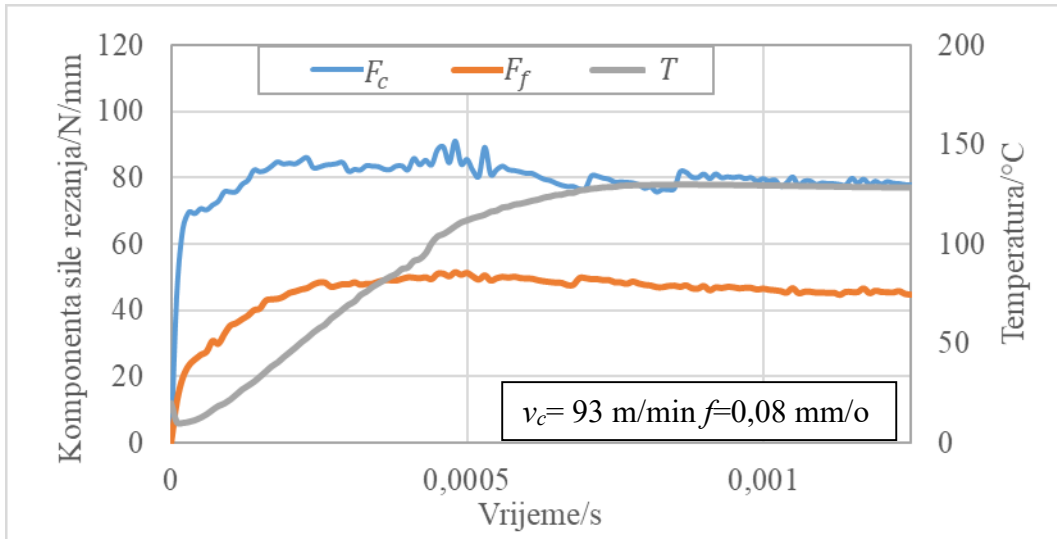




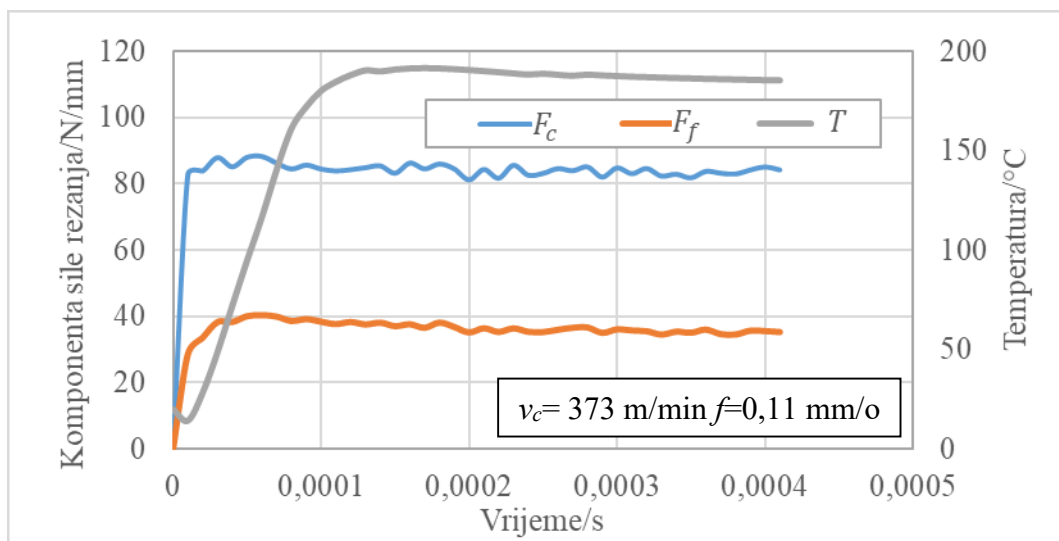
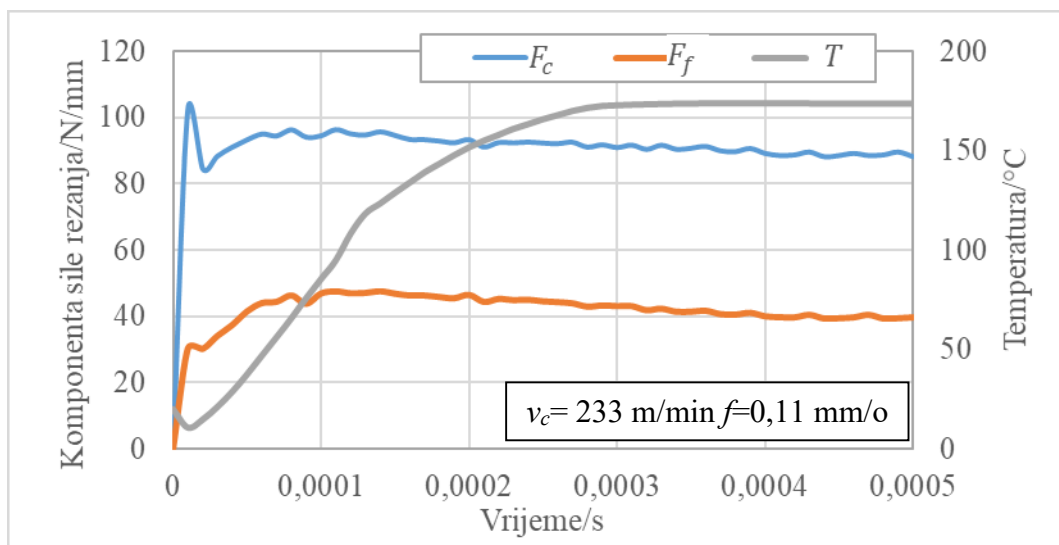
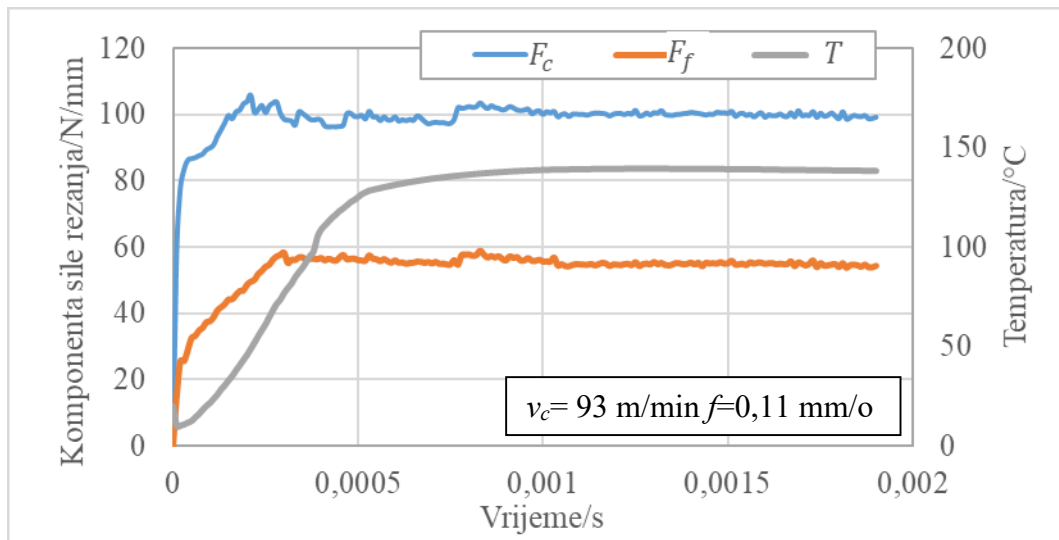
## PRILOG C

U nastavku su prikazani rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem ortogonalnog rezanja te primjenom JCA\_TANH zakona očvršćivanja.









## Životopis

### Ivana Dumanić Labetić

Ivana Dumanić Labetić rođena je 16.08.1993.g. u Splitu. Osnovnu i srednju školu pohađala je i završila u Splitu. Akademске godine 2012./2013. upisuje studij strojarstva na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu. U srpnju 2015. godine stječe zvanje *sveučilišna prvostupnica inženjerka strojarstva*. Iste godine upisuje diplomski studij strojarstva i u srpnju 2017. godine stječe zvanje *magistra inženjerka strojarstva*. Tijekom studiranja primala je stipendiju za izvrsnost i za deficitarna zanimanja. Poslijediplomski doktorski studij strojarstva na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu pod mentorstvom prof. dr. sc. Sonje Jozić upisuje u listopadu 2017.g. Iste godine zapošljava se na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje kao asistent na Zavodu za proizvodno strojarstvo, Katedri za tehnologije. U nastavnim aktivnostima sudjeluje izvodeći laboratorijske vježbe iz kolegija: Materijali 2, Tehnologija 1, Tehnologija 2, Obradni strojevi, Obradni strojevi i sustavi, Obrada odvajanjem i alatni strojevi te Osnove CNC programiranja. Također održava i konstrukcijske vježbe iz kolegija Proizvodnja podržana računalom i Programiranje CNC strojeva. Sudjelovala je u pripremi materijala za nastavu na stručnim, preddiplomskim i diplomskim studijima iz kolegija: Tehnologija 1, Tehnologija 2, Obradni strojevi i sustavi, Osnove CNC programiranja te Programiranje CNC strojeva.

Znanstveno-istraživački projekti na kojima sudjeluje su: Modeliranje i optimizacija postupaka obrade materijala i Recikliranje aluminijskih legura u čvrstom i polučvrstom stanju ALURECSS.

Od 2018. g. član je u organizacijskom odboru međunarodne konferencije Mechanical Technologies and Structural Materials (MTSM). Aktivno se služi engleskim jezikom. U listopadu 2019. godine odlazi u posjet na Universidade de Aveiro u Portugal u sklopu ERAMUS+ programa.

Znanstveno-istraživački rad rezultirao je objavom devet radova u znanstvenim časopisima (šest radova A kategorije i tri rada B kategorije), devet radova u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom (C kategorija) i dva stručna rada.

## **Curriculum Vitae**

### **Ivana Dumanić Labetić**

Ivana Dumanić Labetić was born on August 16, 1993. in Split. She attended and finished primary and secondary school in Split. In the academic year 2012./2013. she enrolled in the undergraduate university study in Mechanical Engineering at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture in Split. In July 2015, she obtained the title of Bachelor of Science in Mechanical Engineering. The same year, she enrolled in the graduate university study in Mechanical engineering and in July 2017, she obtained the title of Master of Mechanical Engineering. During studies, she was receiving a student scholarship for excellence. In October 2017, she enrolled postgraduate doctoral studies in Mechanical engineering at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture in Split under the mentorship of Full Professor PhD. Sonja Jozić. The same year, she was employed at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Shipbuilding as an assistant at the Department of Mechanical Engineering Technology, Department of Technologies. She has been participating in teaching activities by performing laboratory exercises from the courses: Materials 2, Technology 1, Technology 2, Machine tools, Machine tools and systems, Machining and machine tools and Fundamentals of CNC Machine Programming. She has also been engaged in construction exercises from the courses Computer Supported Production and CNC Machine Programming. She participated in the preparation of teaching materials for professional, undergraduate and graduate studies in the courses: Technology 1, Technology 2, Machine tools and systems, Basics of CNC Machine Programming and Programming of CNC machines.

She has been engaged in scientific research projects: Modelling and Optimization of Material Processing and Recycling of aluminum alloys in solid and semi-solid state ALURECSS.

Since 2018, she has been a member of the organizing committee of the International Conference of Mechanical Technologies and Structural Materials (MTSM). She is fluent in English. In October 2019, she went to the Universidade de Aveiro in Portugal as part of the ERAMUS+ program.

The scientific research work resulted in the publication of nine papers in scientific journals (six papers of A category and three papers of B category), nine papers in conference proceedings with international peer-review (C category) and two professional papers.