Plitko gravurno kovanje s aspekta mikrooblikovanja

Keran, Zdenka

Doctoral thesis / Disertacija

2010

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:051559

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

PLITKO GRAVURNO KOVANJE S ASPEKTA MIKROOBLIKOVANJA

DOKTORSKI RAD

ZDENKA KERAN

ZAGREB, 2010.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

PLITKO GRAVURNO KOVANJE S ASPEKTA MIKROOBLIKOVANJA

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Prof.dr.sc. Miljenko Math

Zdenka Keran, dipl.ing.

ZAGREB, 2010.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK:

Ključne riječi:	Mikrooblikovanje, plitko gravurno kovanje, teorija dislokacija, veličina kristalnog zrna, elastični povrat, sila oblikovanja, ukupna deformacija
Znanstveno područje:	TEHNIČKE ZNANOSTI
Znanstveno polje:	STROJARSTVO
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu
Mentor rada:	Prof.dr.sc. Miljenko Math
Broj stranica:	110
Broj slika:	75
Broj tablica:	19
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	50

Datum obrane: 23.09.2010.

Povjerenstvo:

Prof.dr.sc. Franjo Cajner, FSB, Zagreb – predsjednik povjerenstva

Prof.dr.sc. Miljenko Math, FSB, Zagreb – voditelj doktorskog rada

Prof.dr.sc. Bojan Jerbić, FSB, Zagreb – član povjerenstva

Prof.dr.sc. Toma Udiljak, FSB, Zagreb – član povjerenstva

Prof.dr.sc. Branko Grizelj, SF, Slavonski Brod – član povjerenstva

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem svom mentoru prof. dr. sc. Miljenku Mathu na pruženoj podršci, razumijevanju i strpljenju.

Željela bih se zahvaliti svim članovim povjerenstva: prof. dr. sc. Franji Cajneru, prof. dr. sc. Tomi Udiljaku, prof. dr. sc. Bojanu Jerbiću i prof. dr. sc. Branku Grizelju za dobronamjerne i konstruktivne savjete tijekom izrade rada.

Zahvaljujem se tehničaru Laboratorija za oblikovanje deformiranjem gospodinu Karlu Bartu za izniman trud u materijalizaciji svih zamišljenih alata i mjernih uređaja.

Također se zahvaljujem svim svojim prijateljima i kolegama koji su doprinijeli ostvarenju ovog rada.

Na kraju bih se željela zahvaliti svojoj obitelji, posebno suprugu Tomislavu koji je cijelo vrijeme bio uz mene i poticao me da ustrajem.

Zdenka Keran, dipl.ing.

SADRŽAJ

Sadržaj I
Predgovor III
Sažetak IV
Summary V
Ključne riječi VI
Popis oznaka VII
Popis slika IX
Popis tablica XIII

1. UVOD **1**
1.1. Definicija problema 1
1.2. Pregled dosadašnjih istraživanja 2
1.3. Hipoteza 4
1.4. Metodologija i plan istraživanja 4
1.5. Očekivani znanstveni doprinos 5
2. OBLIKOVANJE DEFORMIRANJEM KRISTALNIH STRUKTURA **7**
2.1. Oblikovanje monokristala deformiranjem 7
2.1.1. Naprezanja u različito orijentiranim ravninama monokristala i njihove kritične vrijednosti 10
2.2. Teorija dislokacija 11
2.3. Oblikovanje deformiranjem metala s polikristalnom strukturom 14
2.4. Proces rekristalizacije 16
3. OSNOVNE PRETPOSTAVKE MIKROOBLIKOVANJA **19**
3.1. Definicija mikrooblikovanja 19
3.2. Pristup utjecaju veličine kristalnog zrna s aspekta mikrooblikovanja 21
3.3. Utjecaj minijaturizacije na procese oblikovanja 23
3.4. Teorija sličnosti u procjeni mikroveličinskih utjecaja 26
3.5. Problemi kod procesa mikrooblikovanja 28
3.6. Plitko gravurno kovanje 31
3.6.1. Definicija i podjela procesa plitkog gravurnog kovanja 31
3.6.2. Sila i rad 31
4. PLAN POKUSA I TEHNIKA PROVEDBE EKSPERIMENTA **33**
4.1. Planiranje pokusa slobodnog kovanja 33

4.1.1. Cilj provođenja pokusa i odabir utjecajnih faktora 34
4.1.2. Odabir izlaznih varijabli i faktorskog plana pokusa 35
4.1.3. Provođenje eksperimenta 36
4.1.3.1. Toplinska obrada uzoraka 36
4.1.3.2. Analiza veličine kristalnog zrna 37
4.1.3.3. Tijek mjerenja izlaznih veličina kod slobodnog kovanja 42
4.1.4. Prikaz rezultata 43
4.1.5. Statistička analiza rezultata 47
4.1.5.1. Analiza varijance 48
4.1.5.2. Regresijska analiza 51
4.1.5.3. Prikaz rezultata eksperimenta 52
4.2. Planiranje pokusa kovanja u gravuri 62
4.2.1. Cilj provođenja pokusa i odabir utjecajnih faktora 63
4.2.2. Odabir izlaznih varijabli i faktorskog plana pokusa 63
4.2.3. Provođenje eksperimenta 64
4.2.3.1. Tijek mjerenja izlaznih veličina kod plitkog gravurnog kovanja 64
4.2.4. Prikaz rezultata 65
4.2.5. Statistička analiza rezultata 67
4.2.5.1. Analiza varijance 68
4.2.5.2. Regresijska analiza 69
4.2.5.3. Prikaz rezultata eksperimenta 70
4.3. Zavisnost maksimalnog specifičnog pritiska o stupnju deformacije rondele kod slobodnog kovanja 81
4.4. Sažimanje rezultata eksperimenta i verifikacija hipoteze 82
5. RAČUNALNA SIMULACIJA 86
5.1. Definiranje modela 86
5.2. Algoritam određivanja veličine faktora trenja 91
5.3. Rezultati računalne simulacije 93
5.3.1. Prikaz naprezanja i sile oblikovanja dobivenih numeričkom simulacijom 94
5.4. Analiza razlike u veličini faktora trenja 98
6. ZAKLJUČAK I PREPORUKE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA 100
7. DODATAK 103
8. LITERATURA 105

Životopis **109**

Biography **110**

PREDGOVOR

Tijekom posljednjih dvije i pol tisuće godina plitko gravurno kovanje jedini je proces proizvodnje kovanog novca. Također, otkovci kao proizvod plitkog gravurnog kovanja ne moraju biti samo kovani novac, već i značke, medalje te ostali uporabni predmeti kod kojih se kovanjem oblikuje samo fina geometrija površine. Glavna značajka plitkog gravurnog kovanja je trodimenzionalna sljedivost površinske mikrogeometrije koja može biti vrlo malih dimenzija i vrlo uskih tolerancija izrade. S tim u vezi javljaju se sljedeći problemi ometaju postizanje točnosti izradaka:

- površinska oštećenja,
- nepotpuno ispunjavanje gravure,
- vanjske uključine,
- zarobljavanje ostataka maziva i
- deformiranje nakon rasterećenja uzrokovano zaostalim naprezanjima u obratku i/ili elastičnim povratom materijala obratka.

Ovaj rad bavi se problemima elastičnog povrata materijala te silom potrebnom za ostvarivanje ispravne geometrije i što boljeg popunjavanja gravure kovanice od aluminija čistoće 99,5. Numerički se analizira problem trenja korištenjem metode konačnih elemenata. Problemu je pristupljeno s aspekta tehnologije mikrooblikovanja.

SAŽETAK

U radu je provedena eksperimentalna i numerička analiza procesa plitkog gravurnog kovanja s aspekta mikrooblikovanja. To je novi pristup rješavanju problema oblikovanja proizvoda malih dimenzija koji uzima u obzir utjecaj veličine kristalnog zrna na parametre procesa. Izvršena su mjerenja elastičnog povrata materijala rondele početne visine 2 mm za tri različite veličine kristalnog zrna i to kod slobodnog kovanja i kovanja u gravuri. Mjerena je sila oblikovanja potrebna za zadovoljavajuće popunjavanje gravure ukovnja kod istih veličina zrna. Načinjena je i numerička analiza promjene koeficijenta kontaktnog trenja također za različite veličine kristalnog zrna. Radom je pokazano kako se prilikom plitkog gravurnog kovanja javlja značajna razlika u ponašanju materijala obratka kod različitih veličina kristalnog zrna te oprečno ponašanje parametara procesa prilikom slobodnog kovanja i kovanja u gravuri. Time je proces plitkog gravurnog kovanja nesumnjivo svrstan u procese mikrooblikovanja. Numeričkom analizom dobivena je teorijska zavisnost promjene veličine kontaktnog trenja obzirom na promjenu veličine kristalnog zrna kod specifičnog slučaja slobodnog kovanja.

SUMMARY

The work presents an experimental and numerical analysis of coining process in terms of microforming. This is a new approach to solving the problems of small-sized products design that takes into account the influence of crystalline grain size on the process parameters. Measurements of elastic springback were made on roundels which initial height is 2 mm. This was done for three different grain sizes and also for the open and closed die forging processes. The force required for the satisfactory die filling was measured at the same grain sizes. A numerical analysis of friction coefficient changes was also made for different sizes of crystal grains. The work showed that during coining process a significant difference in the behaviour of workpiece material of different grain sizes appears and also the opposite behaviour of process parameters during open and closed die forging. This behavior classifies coining process into the group of microforming processes without any doubt. Numerical analysis showed theoretical friction coefficient dependence on grain size changes in speciffic case..

KLJUČNE RIJEČI

HRVATSKI	ENGLESKI
mikrooblikovanje	microforming
plitko gravurno kovanje	coining
teorija dislokacija	dislocation theory
veličina kristalnog zrna	grain size
elastični povrat	elastic springback
sila oblikovanja	forming force
ukupna deformacija	total deformation

POPIS VAŽNIJIH OZNAKA

Oznaka	Opis	Korištena jedinica
A	Površina normalnog poprečnog presjeka	mm^2
A_{gr}	Površina projekcije reljefa	mm^2
A_{φ}	Površina ravnine klizanja	mm^2
F	Vlačna sila	N
F_{max}	Konačna sila oblikovanja	N
f_n	Normalna sila	N
F_t	Vanjska sila	N
f_t	Tangencijalna sila	N
h	Radni hod žiga	mm
h_0	Početna visina uzoraka	mm
h_1	Konačna visina uzoraka	mm
h_{uk}	Ukupna deformacija	µm
k	Eksponent geometrijskog stupnja sličnosti	
k_f	Naprezanje plastičnog tečenja	N/mm^2
m_i	Geometrijski utjecajni faktori	
n_i	Negeometrijski utjecajni faktori	
p_{max}	Maksimalni radni pritisak	N/mm^2
r_L	Stupanj sličnosti	
s^2	Nepristrana procjena varijance	
t	Varijabla studentovog testa	
T_r	Temperatura rekristalizacije	℃
T_t	Temperatura taljenja	℃

V_{gr}	Volumen materijala u gravuri	mm^2
W	Rad	J
Δh	Elastični povrat	μm
μ	Očekivanje osnovnog skupa	
σ	Normalno naprezanje	N/mm^2
σ	Standardno odstupanje	
σ^2	Varijanca	
σ_φ	Naprezanje u smjeru normale na ravninu klizanja	N/mm^2
τ	Smično naprezanje	N/mm^2
φ	Logaritamska deformacija	
φ_i	Koeficijent razlike	
Φ_i	Koeficijent podudaranja	
ϕ_z	Veličina zrna	μm

POPIS SLIKA

Slika 1. Pretpostavljeni proces deformiranja pod djelovanjem smične sile: (a) početni ravnotežni položaj, (b) pomak iz ravnotežnog položaja pod djelovanjem sile, ispod granice elastičnosti, (c) pomak iz ravnotežnog položaja pod djelovanjem sile, iznad granice elastičnosti [18]. 8
Slika 2. Deformiranje klizanjem [18]. 8
Slika 3. Ravnine klizanja i pravci klizanja: (a) plošno centrirane kubne rešetke – Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag, γ-Fe, (b) prostorno centrirane kubne rešetke – α-Fe, W, Mo, β-mjed [18]. 9
Slika 4. Deformiranje blizančenjem [18]. 10
Slika 5. Ravnina klizanja u vlačno opterećenoj monokristalnoj epruveti [19]. 11
Slika 6. Dislokacijska shema plastičnog deformiranja kristala [19] 12
Slika 7. Dislokacije: (a) vijčana dislokacija, (b) rubna dislokacija [18]. 13
Slika 8. Zrna polikristala sa različito orijentiranim ravninama klizanja [18]. 16
Slika 9. Neki od proizvoda dobivenih procesom mikrooblikovanja u hladnom stanju [13]. 20
Slika 10. Shematski prikaz oblika proizvoda kod tri stupnja procesa kovanja: a) Klasično kovanje, b) Klasično plitko gravurno kovanje, c) Plitko gravurno kovanje površinske mikrogeometrije [6]. 21
Slika 11. Utjecaj veličine obratka na omjer broja površinskih i unutarnjih zrna: Veliki obradak – zrna na površini/zrna u unutrašnjosti=17/16, mali obradak – zrna na površini/zrna u unutrašnjosti=9/2 [22]. 22
Slika 12. Utjecaji minijaturizacije na procese oblikovanja deformiranjem [23]. 24
Slika 13. Dijagram sila – radni hod kod plitkog gravurnog kovanja [25]. 32
Slika 14. Shematski prikaz korištenog alata za slobodno kovanje. 34
Slika 15. Izrezani i obrađeni ispitni uzorci pripremljeni za daljnu mikroskopsku analizu mikrostrukture. 37
Slika 16. Fotografija površine ispitnog uzorka u nabavnom stanju, prije provedene toplinske obrade. Vidljiva je izrazito usmjerena mikrostruktura nastala prethodnim procesom valjanja lima iz kojeg je uzorak izrezan. 38
Slika 17. Fotografija bazne površine uzorka dobivenog sljedećim režimom toplinske obrade: 450ºC – 2 sata. 39
Slika 18. Fotografija poprečno prerezane površine uzorka dobivenog sljedećim režimom toplinske obrade: 450ºC – 2 sata. 39

Slika 19. Fotografija bazne površine uzorka dobivenog sljedećim režimom toplinske obrade: 450ºC – ½ sata. 40
Slika 20. Fotografija poprečno prerezane površine uzorka dobivenog sljedećim režimom toplinske obrade: 450ºC – ½ sata. 40
Slika 21. Fotografija bazne površine uzorka dobivenog sljedećim režimom toplinske obrade: 350ºC – 2 sata. 41
Slika 22. Fotografija poprečno prerezane površine uzorka dobivenog sljedećim režimom toplinske obrade: 350ºC – ½ sata. 41
Slika 23. Alat kojim je izvršeno eksperimentalno istraživanje 43
Slika 24. Utjecaj veličine zrna ispitnog uzorka i sile deformiranja na ukupnu deformaciju, a) prikaz pojedinačnih mjerenja, b) prikaz aritmetičkih sredina podataka. 45
Slika 25. Utjecaj veličine zrna ispitnog uzorka i sile deformiranja na elastični povrat materijala, a) prikaz pojedinačnih mjerenja, b) prikaz aritmetičkih sredina podataka. 46
Slika 26. Zavisnost elastičnog povrata o ukupnoj deformaciji za pokus slobodnog kovanja. 47
Slika 27. Dijagram ostatka prema normalnoj razdiobi za ukupnu deformaciju. 53
Slika 28. Dijagram ostatka prema normalnoj razdiobi za elastični povrat. 53
Slika 29. Dijagram ostatka u zavisnosti o očekivanim vrijednostima za ukupnu deformaciju. 54
Slika 30. Dijagram ostatka u zavisnosti o očekivanim vrijednostima za elastični povrat. 54
Slika 31. Dijagram vrijednosti t prema rednom broju izvođenja pokusa –ukupna deformacija. 55
Slika 32. Dijagram vrijednosti t prema rednom broju izvođenja pokusa – elastični povrat. 55
Slika 33. Box Cox dijagram transformacija za ukupnu deformaciju. 56
Slika 34. Box Cox dijagram transformacija za elastični povrat. 56
Slika 35. Grafički prikaz utjecaja ulaznih veličina - izlazna veličina je ukupna deformacija. 57
Slika 36. Grafički prikaz utjecaja ulaznih veličina - izlazna veličina je elastični povrat. 58
Slika 37. Grafički prikaz utjecaja sile i veličine zrna na ukupnu deformaciju. 59
Slika 38. Grafički prikaz utjecaja sile i veličine zrna na elastični povrat. 59
Slika 39. (a) 3D prikaz utjecaja sile i veličine zrna na ukupnu deformaciju, (b) 2D prikaz istih utjecaja. Porastom sile i veličine zrna ukupna deformacija ravnomjerno raste. 60
Slika 40. (a) 3D prikaz utjecaja sile i veličine zrna na elastični povrat, (b) 2D prikaz istih utjecaja. Porast elastičnog povrata veći je kod sitnijeg zrna pri porastu sile oblikovanja. 61
Slika 41. Shematski prikaz korištenog alata za plitko gravurno kovanje. 62
Slika 42. Utjecaj ukupne deformacije i veličine kristalnog zrna na silu oblikovanja pri plitkom gravurnom kovanju aluminija Al 99,5. 66
Slika 43. Utjecaj ukupne deformacije i veličine kristalnog zrna na elastični povrat pri plitkom gravurnom kovanju aluminija Al 99,5. 67
Slika 44. Dijagram ostatka prema normalnoj razdiobi za elastični povrat kao izlaznu varijablu. 70
Slika 45. Dijagram ostatka prema normalnoj razdiobi za silu kao izlaznu varijablu. 71

Slika 46. Dijagram ostatka u zavisnosti o očekivanim vrijednostima za elastični povrat. 71
Slika 47. Dijagram ostatka u zavisnosti o očekivanim vrijednostima za silu oblikovanja. 72
Slika 48. Dijagram T vrijednosti prema rednom broju izvođenja pokusa za elastični povrat. 72
Slika 49. Dijagram T vrijednosti prema rednom broju izvođenja pokusa za silu oblikovanja. 73
Slika 50. Box Cox dijagram transformacija za elastični povrat. 73
Slika 51. Box Cox dijagram transformacija za silu oblikovanja. 74
Slika 52. Prikaz vjerojatnosti normalne razdiobe – izlazna veličina je sila. 74
Slika 53. Prikaz vjerojatnosti normalne razdiobe – izlazna veličina je elastični povrat. 75
Slika 54. Grafički prikaz utjecaja ulaznih faktora na silu. 76
Slika 55. Grafički prikaz utjecaja ulaznih faktora na elastični povrat. 76
Slika 56. Prikaz utjecaja ukupne deformacije i veličine kristalnog zrna na elastični povrat pri plitkom gravurnom kovanju aluminija Al 99,5: (a) 3D prikaz (b) 2D prikaz. 77
Slika 57. Prikaz utjecaja ukupne deformacije i veličine kristalnog zrna na silu oblikovanja pri plitkom gravurnom kovanju aluminija Al 99,5: (a) 3D prikaz (b) 2D prikaz. 78
Slika 58. Površina ispitnog uzorka sa označenim detaljem na kojem je provedena analiza kvalitete otiska. 79
Slika 59. Površina uzorka od Al 99,5 veličine zrna 76μm kod ukupne deformacije 800μm. 80
Slika 60. Površina uzorka od Al 99,5 veličine zrna 39μm kod ukupne deformacije 800μm. 80
Slika 61. Odnos maksimalnog specifičnog pritiska i logaritamskog stupnja deformacije za sve tri veličine kristalnog zrna. 82
Slika 62. Usporedni prikaz odzivnih površina mjerenih veličina u ovisnosti o ulaznim parametrima: a) 3D prikaz utjecaja sile i veličine zrna na ukupnu deformaciju kod slobodnog kovanja, b) 3D prikaz utjecaja sile i veličine zrna na elastični povrat kod slobodnog kovanja, c) 3D prikaz utjecaja veličine zrna i ukupne deformacije na elastični povrat kod plitkog gravurnog kovanja, d) 3D prikaz utjecaja veličine zrna i ukupne deformacije na silu oblikovanja kod plitkog gravurnog kovanja. 84
Slika 63. Modifikacija Coulombovog modela trenja: (a) Coulombov model i eksperimentalno utvrđena ovisnost trenja o normalnoj sili, (b) shematski prikaz modificiranog modela koji se koristi u numeričkoj simulaciji [29]. 87
Slika 64. Bilinearni Coulombov model trenja, f_t – sila trenja, ΔU_t – ukupni pomak čvora [29]. 88
Slika 65. Bilinearni konačni element s četiri čvora, element broj 10. [50] 88
Slika 66. 2D osnosimetrični model slobodnog kovanja sa mrežom konačnih elemenata tipa 10: a) Nedeformirani model, b) Deformirani model kod najvećeg stupnja deformacije, c) Povećani detalj najveće distorzije mreže konačnih elemenata na deformiranom modelu kod najvećeg stupnja deformacije. 90
Slika 67. Algoritam određivanja veličine faktora trenja kod slobodnog kovanja uzoraka različite veličine kristalnog zrna. 92
Slika 68. Eksperimentalni i numerički dijagrami porasta sile oblikovanja tijekom procesa slobodnog kovanja (izražen u vremenu s brzinom alata 0,012 mm/s). 94

Slika 69. Raspored maksimalnih naprezanja u obratku, veličina zrna 76 μm, trenje 0,025, maksimalna sila 167 kN. _____ 95
Slika 70. Tok sile u vremenu, veličina zrna 76 μm, trenje 0,025, maksimalna sila 167 kN _____ 95
Slika 71. Raspored maksimalnih naprezanja u obratku, veličina zrna 47 μm, trenje 0,04, maksimalna sila 244 kN. _____ 96
Slika 72. Tok sile u vremenu, veličina zrna 47 μm, trenje 0,04, maksimalna sila 244 kN. _____ 96
Slika 73. Raspored maksimalnih naprezanja u obratku, veličina zrna 39 μm, trenje 0,05, maksimalna sila 293 kN. _____ 97
Slika 74. Tok sile u vremenu, veličina zrna 39 μm, trenje 0,05, maksimalna sila 293 kN. _____ 97
Slika 75. Model trenja u oblikovanju metala deformiranjem prema Bowden-Taboru [18]. _____ 98

POPIS TABLICA

Tablica 1: Problemi kod procesa mikrooblikovanja zabilježeni u literaturi [22]. 30
Tablica 2. Plan pokusa eksperimentalnog istraživanja 36
Tablica 3. Režimi toplinske obrade ispitnih uzoraka. 36
Tablica 4. Veličine kristalnog zrna postignute određenim režimom toplinske obrade. 42
Tablica 5. Pregled članova modela 48
Tablica 6. Analiza varijance. 50
Tablica 7. Analiza varijance nakon logaritamske transformacije. 51
Tablica 8. Prikaz udjela utjecaja faktora i njihove interakcije za ukupnu deformaciju. 58
Tablica 9. Prikaz udjela utjecaja faktora i njihove interakcije za elastični povrat. 58
Tablica 10. Plan pokusa eksperimentalnog ispitivanja kovanja 64
Tablica 11. Pregled članova modela za eksperimentalno ispitivanje kovanja 68
Tablica 12. Analiza varijance za rezultate eksperimentalnog ispitivanja kovanja u gravuri. 69
Tablica 13. Udio utjecaja za silu kao izlaznu veličinu. 75
Tablica 14. Udio utjecaja za elastični povrat kao izlaznu veličinu. 75
Tablica 15. Pregledni prikaz tendencije ponašanja dobivenih rezultata mjerenja provedenog eksperimentalnog istraživanja. 83
Tablica 16. Tablica faktora trenja dobivenih numeričkom simulacijom. 93
Tablica 17. Sila oblikovanja za različite ukupne pomake alata i različite veličine kristalnog zrna. 103
Tablica 18. Elastični povrat materijala za različite veličine kristalnog zrna i različite ukupne deformacije (ukupne pomake alata). 104

Tablica 19. Rezultati izračuna maksimalnog specifičnog pritiska i logaritamskog stupnja deformacije. _____ 104

1. UVOD

1.1. Definicija problema

Tijekom posljednjih dvije i pol tisuće godina plitko gravurno kovanje jedini je proces proizvodnje kovanog novca. Plitko gravurno kovanje jest masivno oblikovanje deformiranjem metalnih materijala. Uobičajeno je da se provodi u zatvorenom ukovnju (iako to nije uvjet) u kojem se oblikuje samo topografija površine rondele bez postizanja ukupno većeg stupnja deformacije materijala. U ovom smislu, plitko gravurno kovanje već je vrlo prošireno za dobivanje funkcionalne i/ili dekorativne geometrije površine. Također, ovako definirani otkovci kao proizvod kovanja ne moraju biti samo kovani novac, već i značke, medalje te ostali uporabni predmeti kod kojih se kovanjem oblikuje samo fina geometrija površine.

Glavna značajka plitkog gravurnog kovanja je trodimenzionalna sljedivost površinske mikrogeometrije koja može biti vrlo malih dimenzija i vrlo uskih tolerancija izrade. Time se zahvaća u jedno novije područje tehnologije oblikovanja deformiranjem – mikrooblikovanje. Važno je naglasiti kako se tehnologija mikrooblikovanja u mnogočemu bitno razlikuje od konvencionalne tehnologije oblikovanja deformiranjem[1].

Budući da je plitko gravurno kovanje proces oblikovanja deformiranjem koji se prirodno povezuje s proizvodnjom kovanog novca, vlasti vrlo strogo kontroliraju ovu tehnologiju kovanja. Zbog toga je moguće pronaći relativno mali broj objavljenih radova o istraživanjima provedenim na tom području, unatoč vrlo dugoj povijesti tehnologije. Među objavljenim radovima nalaze se analize ravninskog stanja deformacije te osnosimetrične analize deformacije. Ipak, mali broj njih eksperimentalno obrađuje realne probleme koji se javljaju u procesu proizvodnje.

U novije vrijeme, uslijed povećanih zahtjeva za visokopreciznom proizvodnjom i mikrooblikovanjem izradaka, aktualizirala se primjena tehnologije plitkog gravurnog kovanja za potrebe proizvodnje nekih elektroničkih komponenti. S obzirom na to, plitko

[1] Spomenute razlike navedene su i objašnjene u trećem poglavlju rada.

gravurno kovanje zahtijeva intenzivnije bavljenje pojedinačnim problemima i osuvremenjivanje pristupa toj tehnologiji kako bi se što više otvorilo mogućnostima postizanja najrazličitijih mikrogeometrija površine.

Kako se to na prvi pogled čini, proces plitkog gravurnog kovanja vrlo je jednostavan. On je ništa drugo nego postizanje geometrijskog podudaranja gravure ukovnja i radnog komada plastičnim deformiranjem. Čak i za ekstremno uske tolerancije u mikropodručju, čini se mogućim dovršiti proces. Međutim, sljedeći problemi ometaju postizanje točnosti izradaka:

- površinska oštećenja,
- nepotpuno ispunjavanje gravure,
- vanjske uključine,
- zarobljavanje ostataka maziva i
- deformiranje nakon rasterećenja uzrokovano zaostalim naprezanjima u obratku i/ili elastičnim povratom materijala obratka.

Ovaj rad bavit će se posljednjim navedenim problemom – elastičnim povratom materijala te silom potrebnom za ostvarivanje ispravne geometrije i što boljeg popunjavanja gravure kovanice od aluminija čistoće 99,5. Numerički će se analizirati problem trenja korištenjem metode konačnih elemenata. Problemu će biti pristupljeno s aspekta tehnologije mikrooblikovanja. Pronaći će se najpovoljniji parametri procesa koji zadovoljavaju zahtjev za dobivanjem ispravnog izratka.

1.2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Potrebe za mikrooblikovanjem materijala i/ili mikroskopskom kontrolom teksture površine u porastu su tijekom proteklih desetljeća. Procesi oblikovanja deformiranjem uz sebi svojstvenu visoku produktivnost, omogućavaju značajnu preciznost i izvrsnu izradu vrlo fine topografije površine što je naročito uočljivo u procesima plitkog gravurnog kovanja čija je povijest stara oko dvije i pol tisuće godina. U procesu plitkog gravurnog kovanja dimenzija površinske mikrogeometrije može se kontrolirati unutar par desetaka mikrometara ili čak i manje. Međutim, izvještaji o tehnološkim istraživanjima vrlo su limitirani što je zasigurno odraz važne socijalne uloge kovanja novca.

Bocharov, Kobayashi i Thomsen [1] objavili su 1962. godine rad koji daje osnove procesa plitkog gravurnog kovanja. Ipak, njihovi modeli bolje odgovaraju uobičajenim procesima kovanja zbog dimenzija gravure koja ostaje reda veličine rondele koja se kuje. Ako se govori o kovanju 3D površinske mikrogeometrije, jasno je da se ona postiže deformiranjem samo površinskog sloja rondele.

Početak opisivanja deformiranja površinskog sloja isključujući u potpunosti ukupno deformiranje rondele veže se uz Baya i Wanheima [2, 3] 1976. godine. Površinska hrapavost prikazana je kao temeljni problem u tribologiji oblikovanja deformiranjem budući da ona utječe na mehanizam podmazivanja kao mogući mikroizvor maziva. Pred kraj 80-ih godina objašnjen je utjecaj deformabilnosti rondele na topografiju površine u radovima Wilsona, Sheua, Sutcliffea, Makinouchia, Ikea, Mukarawa i Koga [4, 5]. O efektima klizanja među površinama alata i obratka na zaglađivanje površinske hrapavosti pisao je Johnson 1968 [6].

U novije vrijeme većina istraživanja plitkog gravurnog kovanja odnosi se na 2D i 3D FEM simulacije i pokušaj općenitog analitičkog opisivanja procesa – Forcellese, Fratini, Gabrielli, Micari, Choi, Lee, Jun, Kang [7, 8].

Ike i Plančak 1998. [1] povezuju probleme deformiranja površinskog sloja rondele kod plitkog gravurnog kovanja sa problemima koji se javljaju u mikrooblikovanju. Geiger i suradnici [9] se u radovima koji se odnose na probleme volumenskog mikrooblikovanja pozivaju na poveznicu s plitkim gravurnim kovanjem: Ikea i Plančaka.

1999. godine Byun, Huh i Kang [10] upućuju na problem elastičnog povrata materijala obratka kod plitkog gravurnog kovanja, ali je on nedovoljno obrađen budući da je promatran s aspekta klasičnog oblikovanja deformiranjem.

2007. Wang, Shan, Zhou, Guo i Sun [11] prikazuju utjecaj odnosa veličine zrna i mikrodimenzija gravure na popunjavanje gravure ukovanja.

Za postavljanje hipoteze ovog rada potrebno je istaknuti vrlo iscrpne radove iz područja mikrooblikovanja koji obrađuju kako samu teoriju mikrooblikovanja[2] - Geiger, Kleiner, Eckstein, Tiesler, Engel, Raulea, Messner, Kals, Zhang, Kun i dr. [12, 13, 14], tako i pojedinačne primjere i probleme - Jun, Kang, Lee, Park, Joun, Jeon, Hata, Chang, Hu i ostali [15, 16, 17].

[2] Osnovne pretpostavke mikrooblikovanja opisane su u trećem poglavlju rada.

1.3. Hipoteza

Jedan od problema, koji se često javlja kod plitkog gravurnog kovanja, jest loše ispunjavanje dijelova gravure ukovnja koji se sastoje od utora vrlo malih dimenzija, a drugi je loša kvaliteta dobivene površine. Vezano s tim, događa se i pojava rasipanja rezultata sile kojom se materijal kuje, odnosno različito ponašanje materijala pod djelovanjem iste sile.

Budući da se kod kovanja kovanica gotovo redovito radi o proizvodu relativno malih dimenzija (1-2 mm visine), pretpostavlja se kako se ovom tehnologijom ulazi u područje mikrooblikovanja. Mikrooblikovanje kao novija tehnologija oblikovanja deformiranjem daje i novi pristup obratku. Obradak se promatra kao skup kristalnih zrna određenog materijala u zadanom obliku i dimenziji. Razlog tomu su male dimenzije obratka kod kojih pojedinačno kristalno zrno zauzima sve veći volumenski udio proizvoda. Ponašanje materijala u takvim procesima značajno je drugačije nego u standardnim procesima oblikovanja. Jedna od važnih karakteristika je različito ponašanje materijala prilikom oblikovanja kojim mu se dozvoljava slobodno tečenje te prilikom oblikovanja u gravuri koja mu tečenje ograničava. S tim u vezi, pretpostavlja se da će se materijal rondele ponašati prema zakonitostima mikrooblikovanja[3] i prilikom slobodnog kovanja, kao i prilikom kovanja u gravuri ukovnja. Time bi trebalo biti dokazano kako plitko gravurno kovanje u cijelosti treba promatrati s aspekta mikrooblikovanja, a ne samo kao površinsku deformaciju, u cilju popunjavanja gravure vrlo malih dimenzija kako bi se izbjegli neki od problema koji se tijekom proizvodnje javljaju.

1.4. Metodologija i plan istraživanja

Kako bi se navedeno dokazalo, bit će provedeni eksperimenti slobodnog kovanja rondele od Al 99,5, početne visine 2 mm različitim silama. Pri tome će se toplinskom obradom mijenjati veličina kristalnog zrna obratka, a obratci različite veličine zrna bit će slobodno tlačeni alatom ravnih ploha unaprijed određenom silom. Tijekom eksperimenta mjerit će se ukupna deformacija i elastični povrat za određenu silu. Svrha

[3] Opisano u poglavlju 3.3.

ovog dijela istraživanja jest pokazati značajnu razliku u ponašanju obratka male visine tijekom procesa deformiranja za različite veličine kristalnog zrna.

U drugom dijelu eksperimentalnog istraživanja jednaki ispitni uzorci kovat će se u otvorenom ukovnju predviđenom za kovanje značaka. Djelovanjem ukovnja djelomično će se ograničiti tečenje materijala i provjeriti ponašanje materijala različite veličine kristalnog zrna (elastični povrat kod sile potrebne za popunjavanje gravure) u novim uvjetima. Nadalje, pratit će se kvaliteta dobivene površine pri različitim silama za različitu veličinu kristalnog zrna. Pod kvalitetom dobivene površine u ovom slučaju podrazumijeva se potpuno popunjavanje gravure alata. Ovaj dio istraživanja analizirat će ponašanje materijala iste veličine kristalnog zrna kod slobodnog kovanja i kovanja u ukovnju te također dati i prikaz ovisnosti veličine zrna i kvalitete dobivene površine (točnosti popunjavanja gravure alata).

S ciljem dobivanja što bolje ponovljivosti rezultata provest će se odgovarajući broj eksperimenata.

Treći dio istraživanja odnosit će se na problem značajne promjene veličine kontaktnog trenja promjenom veličine kristalnog zrna. Ova pojava također je karakteristična za procese mikrooblikovanja. Kontaktno trenje analizirat će se numeričkom simulacijom korištenjem metode konačnih elemenata.

1.5. Očekivani znanstveni doprinos

Oslanjajući se na radove Ikea i Plančaka koji deformiranje površinskog sloja kod kovanja kovanica nesumnjivo svrstavaju u područje mikrooblikovanja te uz pomoć teorije mikrooblikovanja[4] obrađene od strane Geigera, Engela i Ecksteina, pokušat će se plitko gravurno kovanje u cijelosti prikazati kao posebni slučaj mikrooblikovanja.

Za razliku od dosadašnjih istraživanja, teorija mikrooblikovanja primjenit će se za analizu ne samo dijelova gravure vrlo malih dimenzija i deformiranja površinskog sloja obratka, nego općenito na plitko gravurno kovanje rondela male visine.

Dobiveni rezultati trebali bi dati analizu odnosa sile, ukupne deformacije i elastičnog povrata materijala za različite veličine kristalnog zrna prilikom slobodnog kovanja i kovanja u ukovnjima. Sukladno teoriji mikrooblikovanja[5], očekuju se oprečni

[4] Odnosi se na poglavlja 3.2. i 3.3.
[5] Odnosi se na poglavlja 3.2. i 3.3.

rezultati za slobodno kovanje i kovanje u gravuri. Uzimajući u obzir kvalitetu dobivene površine bit će moguće sugerirati smjernice o potrebnim svojstvima materijala koji će moći dati kako optimalne parametre procesa tako i zadovoljavajuću kvalitetu površine. Potrebno je napomenuti kako će se navedene smjernice odrediti prema analiziranim problemima elastičnog povrata i s tim u vezi problemima točnog popunjavanja gravure alata.

Nadalje, numeričkom simulacijom dobit će se teorijska zavisnost promjene veličine kontaktnog trenja obzirom na različite veličine kristalnog zrna kod slobodnog kovanja. Kao ulazna veličina koristit će se eksperimentalno dobivene krivulje plastičnog tečenja koje odgovaraju pojedinoj veličini kristalnog zrna. Očekuje se da će dobiveni rezultati biti primjenjivi u rješavanju problema proizvodnje kovanica ne samo od aluminijskih materijala, nego, analogno dobivenim rezultatima, i iz drugih metalnih materijala.

2. OBLIKOVANJE DEFORMIRANJEM KRISTALNIH STRUKTURA

2.1. Oblikovanje monokristala deformiranjem

Pod monokristalom se podrazumijeva dio metala unutar kojeg u svim njegovim zonama, i neovisno o vanjskom obliku, postoji jedinstvena prostorna rešetka. Premda tehnički materijali uobičajeno nemaju monokristalnu strukturu nego polikristalnu, potrebno je poznavati mehanizam deformiranja jednog monokristala, budući da zakonitosti ustanovljene na njemu mogu, uz odgovarajuća ograničenja, vrijediti i za polikristalnu strukturu.

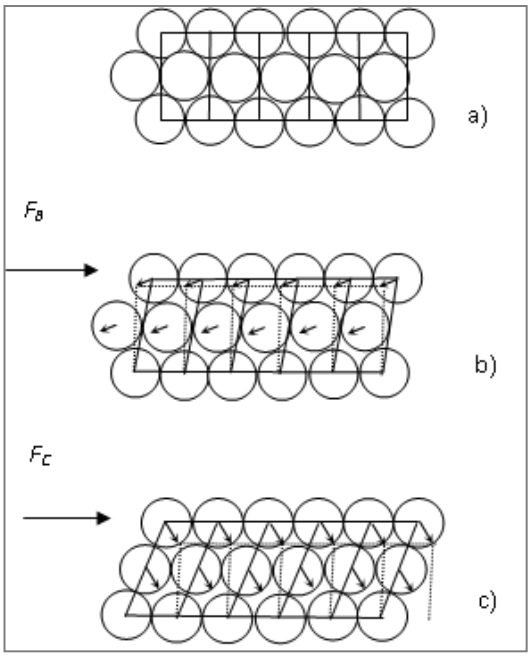
Kada vanjske sile djeluju na neko tijelo, dolazi do promjena oblika i dimenzija tog tijela. Te se promjene sastoje od elastičnih i plastičnih deformacija.

Kod elastičnih deformacija postoji značajna korelacija između deformacije i unutarnje energije. Ako vanjske sile prijeđu granicu elastičnosti atomi se pomiču prema položajima odakle ih kohezivne sile nastoje pomaknuti u nove položaje u rešetki. S obzirom na to da su novi položaji ravnotežni položaji, taj tip deformacije ne nestaje kada dođe do rasterećenja i nastupa plastična deformacija.

Kada se atomi gibaju iz jednog u drugi ravnotežni položaj kako je prikazano na slici 1. za to gibanje su potrebne velike količine energije uzduž onih ravnina gdje je razmak među atomima maksimalan i prema tome sila veze minimalna.

Općenito govoreći, deformiranje kristala (monokristala) može se izvršiti na dva načina [18]:

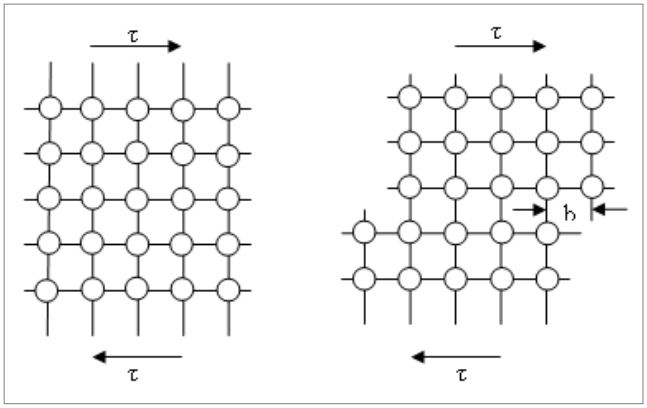
- Klizanjem,
- Blizančenjem.



Slika 1. *Pretpostavljeni proces deformiranja pod djelovanjem smične sile: (a) početni ravnotežni položaj, (b) pomak iz ravnotežnog položaja pod djelovanjem sile, ispod granice elastičnosti, (c) pomak iz ravnotežnog položaja pod djelovanjem sile, iznad granice elastičnosti [18].*

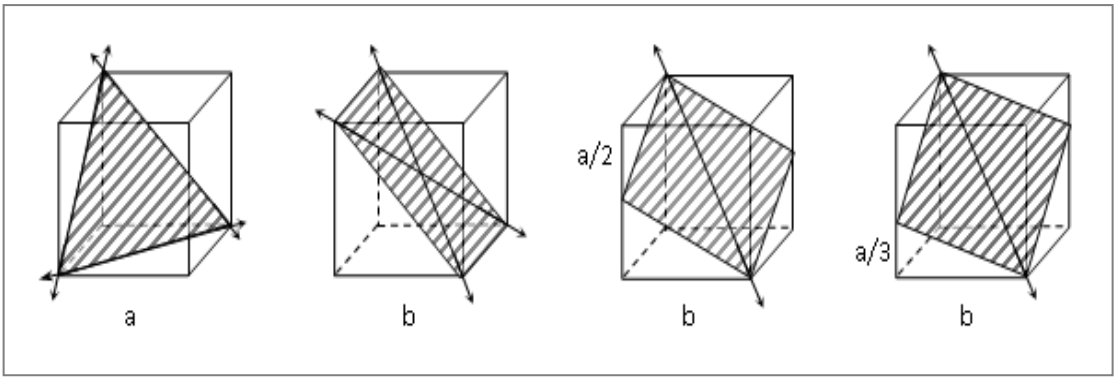
a) Deformiranje klizanjem

Prema postojećoj teoriji, u ovom slučaju se određeni slojevi kristala pomiču u odnosu na druge slojeve po ravninama klizanja. Na slici 2. shematski je prikazano kao paralelno pomicanje više redova atoma u jednom dijelu kristala u odnosu na njegov drugi dio. Ovakvo objašnjenje deformiranja klizanjem je, međutim, samo uvjetno i vrlo pojednostavljeno, budući da se u stvarnosti pomicanje redova atoma ne vrši istovremeno.



Slika 2. *Deformiranje klizanjem [18].*

Klizanje predstavlja paralelno pomicanje tankih slojeva monokristala u odnosu na susjedne slojeve. Ovo se klizanje u monokristalima događa po kristalografskim ravninama s najgušće raspoređenim atomima koje se nazivaju ravninama klizanja. Pravci klizanja su oni u kojima je rastojanje atoma najmanje.

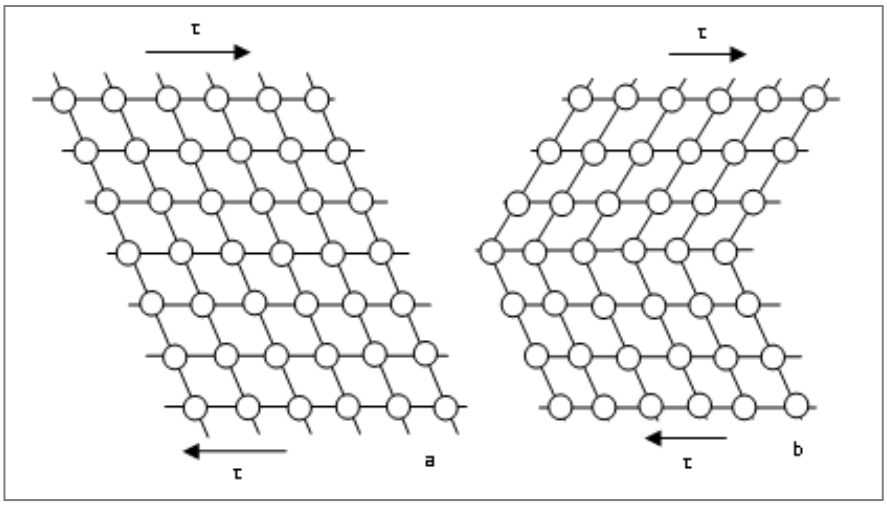


Slika 3. *Ravnine klizanja i pravci klizanja: (a) plošno centrirane kubne rešetke – Cu, Al, Ni, Pb, Au, Ag, γ-Fe, (b) prostorno centrirane kubne rešetke – α-Fe, W, Mo, β-mjed [18].*

Deformabilnost metala u velikoj je mjeri ovisna o kristalnoj strukturi. Metali s većim brojem kliznih ravnina i pravaca klizanja bit će općenito uzevši deformabilniji pa je to razlog zašto su metali i slitine sa kubnom rešetkom deformabilniji od onih sa heksagonskom ili tetragonskom rešetkom.

b) Deformiranje blizančenjem

Shema deformiranja kristala blizančenjem prikazana je na slici 4. Ono se sastoji od pomicanja atoma u ravninama koje su paralelne ravnini blizančenja i to tako što je veličina tog pomicanja srazmjerna udaljenosti ovih ravnina od ravnine blizančenja. Na taj način se deformirani dio kristala pojavljuje kao zrcalna slika njegovog dijela s druge strane ravnine blizančenja. Ovakav oblik deformiranja monokristala nije čest, a susreće se pri velikim brzinama deformiranja kakve se npr. javljaju kod kovanja pomoću bata, dok se u najvećem broju slučajeva plastično deformiranje monokristala vrši klizanjem.



Slika 4. *Deformiranje blizančenjem [18].*

2.1.1. Naprezanja u različito orijentiranim ravninama monokristala i njihove kritične vrijednosti

Za ostvarenje plastične deformacije jednog monokristala neophodno je da maksimalno smično naprezanje u njemu dostigne kritičnu vrijednost. Ako se promatra slučaj rastezanja epruvete izrađene od monokristala (slika 5.), može se zaključiti sljedeće [19]:

Površina ravnine klizanja, u kojoj djeluje smično naprezanje τ, N/mm^2 bit će:

$$A_\varphi = A/\cos\varphi,\ \text{mm}^2 \tag{1}$$

S druge strane, vlačna sila mora biti:

$$F = \sigma A = \sigma_\varphi A_\varphi\ ,\ \text{N} \tag{2}$$

Gdje je σ, N/mm^2 normalno naprezanje u pravcu djelovanja vlačne sile koje djeluje na ravninu normalnog presjeka A, mm^2 a σ_φ, N/mm^2 je naprezanje u istom pravcu, ali svedeno na površinu presjeka u ravnini klizanja A_φ, mm^2.

Prema tome, može se pisati:

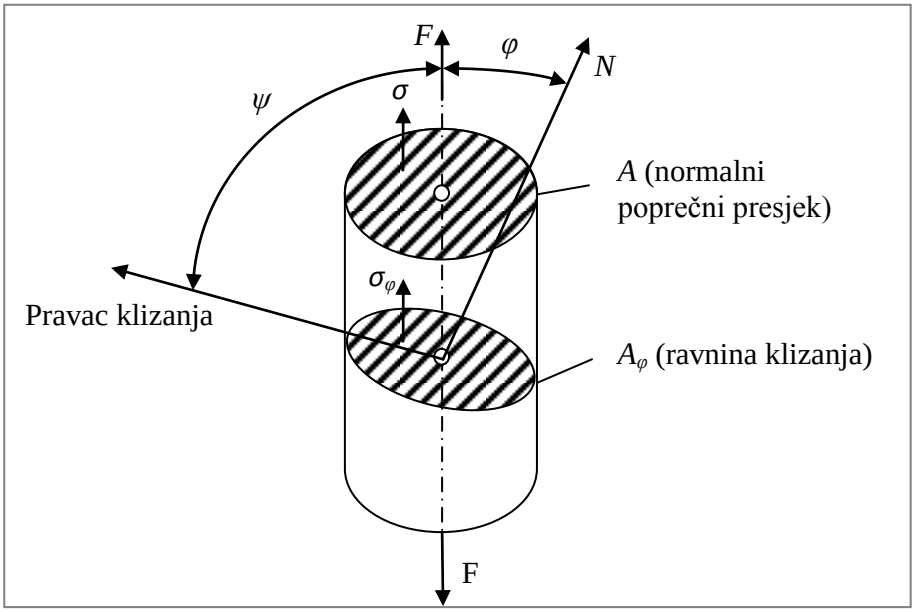
$$\sigma_\varphi = \sigma\frac{A}{A_\varphi} = \sigma\cos\varphi,\ \text{N/mm}^2 \tag{3}$$

Smično naprezanje τ u pravcu klizanja bit će, kao komponenta naprezanja σ_φ, N/mm^2:

$$\tau \approx \sigma_\varphi\cos\psi\ ,\ \text{N/mm}^2 \tag{4}$$

Odnosno,

$$\tau \approx \sigma \cos\varphi \cos\psi \ , \ \text{N/mm}^2 \tag{5}$$



Slika 5. *Ravnina klizanja u vlačno opterećenoj monokristalnoj epruveti [19].*

Na temelju izraza (5) moguće je izračunati smično naprezanje u bilo kojoj smičnoj ravnini. Može se, također, postići i obrnuto, tj. za poznatu vrijednost kritičnog naprezanja τ, N/mm^2 pronaći orijentacija ravnine klizanja. Iz istog izraza se jasno zaključuje kako će ovo naprezanje dostići svoju maksimalnu vrijednost kada kutovi budu φ=ψ=45º. U tom slučaju bit će:

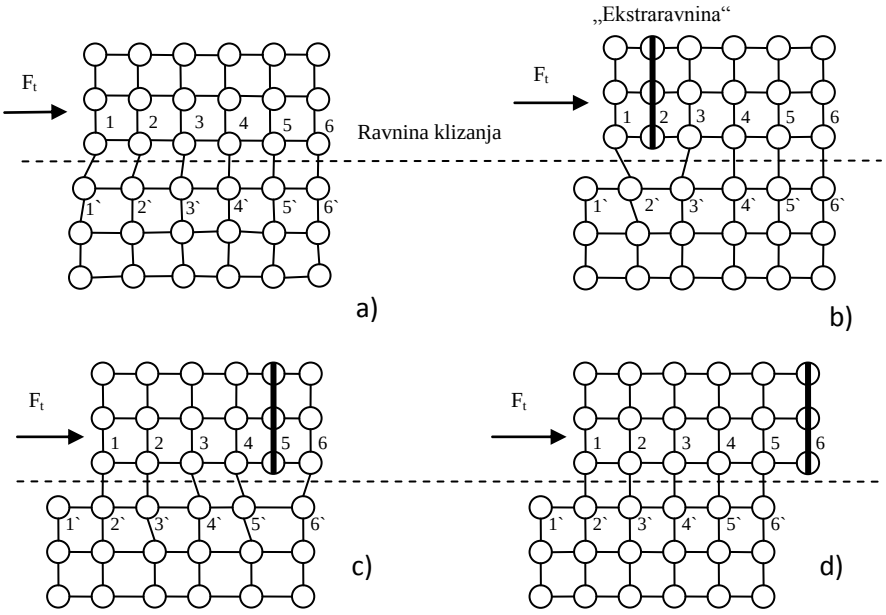
$$\tau_{max} = 0{,}5\sigma \ , \ \text{N/mm}^2 \tag{6}$$

2.2. Teorija dislokacija

Korištenjem navedenih podataka o deformiranju translacijom i s obzirom na poznavanje fizikalnih svojstava pojedinih metala, veličine međuatomnih sila koje pružaju otpor promjeni ravnotežnih položaja atoma u rešetci i broja atoma (oko 10^{14} po kvadratnom centimetru presjeka) moguće je izračunati iznose vanjskih sila koje bi bile potrebne za plastično deformiranje nekog monokristala. Takvi proračuni su u prošlosti i provedeni, međutim, rezultati su uvijek pokazivali sile koje su bile puno veće od stvarno potrebnih.

Prema kasnijim saznanjima translacija kristala ne vrši se uz istovremeno pomicanje svih atoma sa jedne strane klizanja u odnosu na drugu. Stvarni proces odvija

se načelno prema shemama na slici 6. Vanjska sila F_t, N koja djeluje na kristal izaziva u početku samo elastične deformacije, pri čemu se redovi atoma iznad ravnine klizanja pomiču samo za manje iznose. Sa porastom sile F_t, N ova pomicanja također rastu i u nekom trenutku red atoma 1 prelazi neutralan položaj između donjih redova 1` i 2`, povezujući se u svom rasporedu za red 2`. Istovremeno gornji red 2 pretvara se u tzv. ekstraravninu (koja nema odgovarajuću ravninu sa atomima s druge strane ravnine klizanja) i formira oblik nesavršenstva kristalne rešetke koji je poznat kao dislokacija (pod dislokacijama općenito treba podrazumijevati specijalne nepravilnosti u građi kristala koje su reda veličine atomskih iznosa, a očituju se u poremećajima neprekidnosti i pravilnosti rasporeda atoma u kristalu). Formiranje dislokacije dovelo je do odgovarajućeg lokalnog poremećaja u pravilnosti rasporeda atoma sa obje strane ravnine klizanja. U toku daljnjih koraka deformiranja proces se odvija tako što se red 2 i dalje pomiče, potiskujući pred sobom red 3, koji se onda pretvara u ekstraravninu (dok red 2 zauzima ravnotežni položaj iznad reda 3`), a zatim se to događa sa redom 4 itd. Na taj način se dislokacija predaje od jednog reda atoma do drugog, dok na kraju ne stigne na površinu kristala. Konačni rezultat je izvršeno pomicanje za jedan međuatomski razmak kao što je to bio slučaj i na slici 1. Međutim, razlika u samom mehanizmu deformiranja u ova dva slučaja je vrlo velika. Sila potrebna za pomicanje dislokacije kroz kristal neusporedivo je manja nego što bi bila sila potrebna za istovremeno pomicanje svih redova atoma s jedne strane ravnine klizanja.

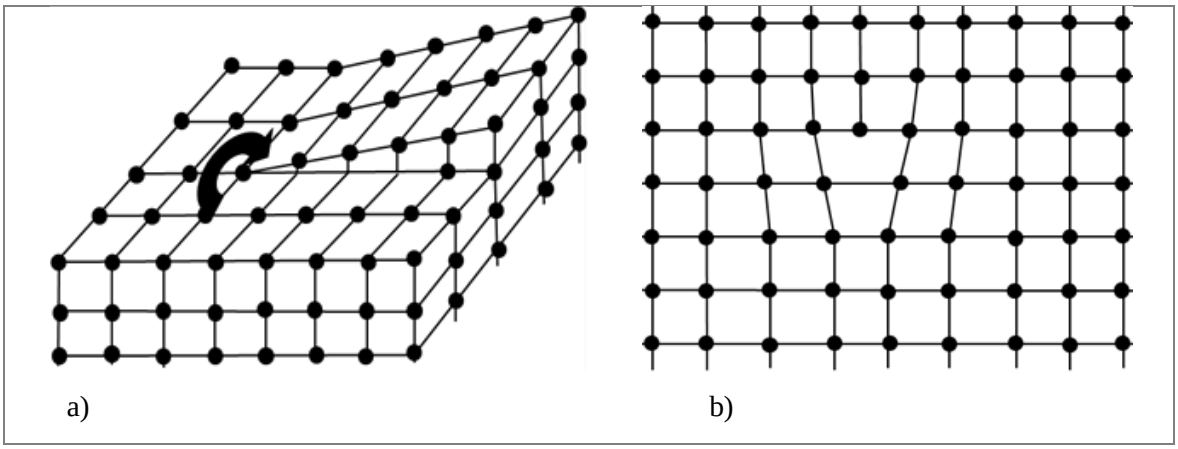


Slika 6. *Dislokacijska shema plastičnog deformiranja kristala [19]*

Ipak, treba primijetiti da je u ovom slučaju u početku potrebna znatno veća sila za pomicanje prvog reda atoma i formiranje dislokacije, nego za njeno kasnije pomicanje kroz kristal. Stoga se može zaključiti da će se plastično deformiranje moći ostvariti sa znatno manjim vanjskim silama ukoliko u metalu već postoje dislokacije.

Ima više vidova poremećaja u građi realne atomske rešetke. Dislokacija je jedno od takvih nesavršenstava. To znači da dislokacije ne nastaju samo kao posljedica deformiranja, već i u procesima kristalizacije, toplinske obrade, itd.

Kod realnog monokristala postoje točkaste dislokacije (tzv. nuldimenzionalne), mjesta nepopunjena jednim atomom (praznine) ili mjesta gdje se nalazi jedan suvišni atom, te bridne dislokacije (jednodimenzionalne). Površinske dislokacije (dvodimenzionalne) su linijske dislokacije na granicama zrna ili faza. One mogu imati i različite složenije oblike – zakrivljene, zavojne, itd. Primjeri bridne (rubne) i površinske dislokacije prikazani su na slici 7.



Slika 7. *Dislokacije: (a) vijčana dislokacija, (b) rubna dislokacija [18].*

Postupno premještanje dislokacije navedenim mehanizmom, a zbog djelovanja smičnog naprezanja, odvija se sve dok dislokacija ne dospije na površinu monokristala. Budući da ih je mnoštvo u monokristalu, sve ove dislokacije prolaze cijelim kristalom i gomilaju se na njegovim granicama. Međutim, ostvarivanje takvog mehanizma premještanja ne odvija se glatko. Premještanje će, zbog nekih smetnji unutar kristala, biti otežano ili čak zakočeno. Ako se dislokacija premješta u različitim ravninama, bit će „usidrena“. Kočenje dislokacije na putu premještanja ili potreba da se „otrgne“ od prepreke u kliznoj ravnini zahtijeva povećanje smičnog naprezanja neophodnog za ostvarenje klizanja. Jednako tako, smično će naprezanje biti povećano ako dolazi do

premještanja neke druge slobodne dislokacije koja se nalazi u ravnini manje povoljne orijentacije. Kristal dakle, za napredovanje plastične deformacije do svoje granice, zahtijeva sve veće smično naprezanje, što znači da pruža sve veći otpor plastičnoj deformaciji.

Tako se objašnjava očvršćenje monokristala pri hladnoj deformaciji koje je osnova očvršćenju metala. Pokretljivost dislokacija kod sobne temperature je mala pa je efekat očvršćenja pri tom značajan. Nakon određenog i vrlo velikog broja dislokacija na površini metala (red veličine na 1 cm^2 je 10^{11} do 10^{12} dislokacija), duktilnost metala znatno je smanjena, a time i sposobnost njegovog daljnjeg plastičnog oblikovanja.

2.3. Oblikovanje deformiranjem metala s polikristalnom strukturom

Realno ponašanje metalnog materijala nije moguće objasniti samo proučavanjem monokristala budući da metali imaju polikristalnu strukturu koju karakteriziraju, pored ostalog, heterogenost građe, prisustvo nemetalnih uključina, veličina i oblik zrna, itd. Zbog ovog razloga se proučavanja moraju vršiti i s aspekta makrostrukture, da bi tek oba pristupa dali potpunu predodžbu o svojstvima i ponašanju metalnih materijala.

Kristalna struktura nastaje pri kristalizaciji litine. Atomi ne miruju ni u čvrstom ni u tekućem stanju, već osciliraju s amplitudama čija je veličina srazmjerna temperaturi na kojoj se metal nalazi. U toku hlađenja smanjuje se energija osciliranja pojedinih atoma (koji se u kapljevitom stanju nalaze u kaotičnom rasporedu). Kad se ona reducira do odgovarajućeg iznosa, određeni broj atoma nađe se u stanju međusobne ravnoteže, oscilirajući i dalje sa manjim amplitudama oscilacije, ali sada oko svojih ravnotežnih položaja. Na taj način formiraju se prvi centri kristalizacije. Pri daljnjem hlađenju oko ovih centara nadovezuju se nove atomske rešetke i to u potpuno pravilnom i zakonitom rasporedu u odnosu na njih. Tako dolazi do stvaranja i rasta sve većih prostornih kristala. Ovi kristali, naravno, ne mogu rasti neograničeno budući da se poslije nekog vremena sudaraju sa drugim, susjednim rastućim kristalima. Konačno se dobije kristal koji je ometen u svom daljnjem rastu, sa manje-više izlomljenim, odnosno nepravilnim granicama. Za razliku od kristala koji bi nastao potpuno neometanom kristalizacijom, ovaj se naziva kristalit ili zrno [19]. Broj zrna, odnosno njihova veličina, ovisit će prvenstveno o broju centara kristalizacije. Ukoliko je taj broj veći, dobit će se sitnozrnatija struktura i obrnuto.

Kristalna građa unutar jednog kristalita je jedinstvena i sve atomske rešetke u njemu imaju istu kristalografsku orijentaciju, koja je određena stohastički, tj. početnom orijentacijom centra kristalizacije oko kojeg je zrno formirano. To vrijedi za svaki kristalit posebno. Međutim, orijentacija jednog kristala ne utječe na orijentaciju drugih, tako da se po potpunom očvršćavanju dobiva struktura sa najrazličitijim orijentacijama zrna. Takva struktura naziva se polikristalna.

Mehanička svojstva jednog elementarnog kristala (pa i čitavog monokristala) različita su u različitim pravcima, tj. kristali su karakterizirani svojstvom anizotropije. Ipak, kod polikristalnih materijala ovo svojstvo ne mora biti izraženo. Naime, ako je polikristalna struktura formirana normalnom kristalizacijom i pri tome postala neusmjerena, onda će anizotropija biti izražena u okviru pojedinih zrna, ali će zbog njihove najrazličitije orijentacije u prostoru i vrlo velikog broja, makro-svojstva metala biti uglavnom ujednačena u svim pravcima. U tom slučaju govori se o svojstvu poznatom kao kvazi-izotropija. Ukoliko, međutim, dođe do naknadnog oblikovanja deformiranjem, pojavljuje se usmjerenost pojedinih zrna pa metal postaje anizotropan.

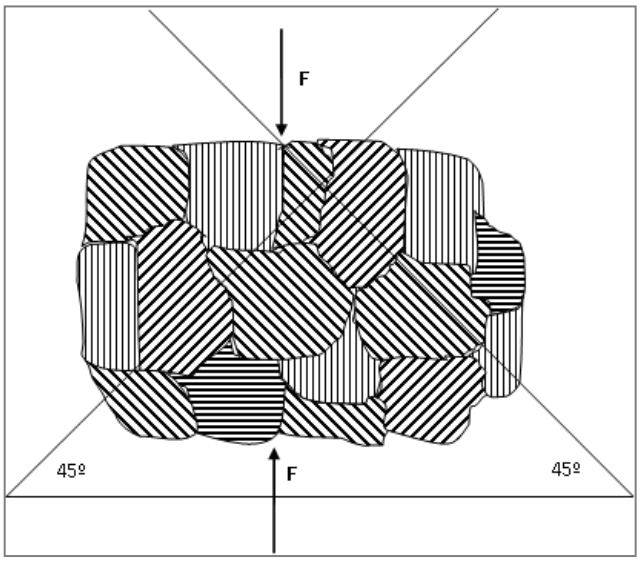
Kada na polikristaliničan materijal djeluju sile, dolazi do klizanja u onim ravninama koje imaju najpovoljniju orijentaciju za deformaciju i to kada sila klizanja dosegne kritičnu vrijednost. Nakon što je deformacija napredovala do neke veličine, mogućnost za daljnju deformaciju je iscrpljena. Rotacija koja prati klizanje dovela je druge kristale, koji su ranije bili manje povoljno orijentirani, u položaj da se mogu deformirati. Deformacijom tih kristala dolazi do daljnje rotacije. Rezultat tih rotacija je u tome da nakon napredovanja deformacije do neke veličine nastupa povoljna orijentacija. Većina kristalita nastoji se poravnati sa nekim svojim kristalnim osima u smjeru povoljnom za deformaciju. Što se deformacija povećava, to je orijentacija povoljnija.

Kako su granice zrna postale mjesta koncentracije nepravilnosti atomne rešetke, to je sada najveća nepravilnost kristalne građe. One predstavljaju konačnu prepreku u daljnjem napredovanju dislokacija i ostvarenju deformacije. Uz djelovanje iste veličine deformacijske sile, mogućnost deformacije na granicama zrna će stoga biti manja od one u unutrašnjosti zrna kristala. Posljedica toga je da će realni polikristalinični metal pružati znatno veći otpor plastičnoj deformaciji nego što je to bio slučaj kod realnog monokristala. To je razlog potrebe većeg naprezanja za ostvarivanje plastične deformacije, dakle povećanja naprezanja plastičnog tečenja k_f, N/mm^2. Na veličinu sile

potrebne za plastičnu deformaciju utječe i veličina zrna polikristaliničnog metala. Kod postojanja sitnozrnatije strukture metala valja očekivati i povećan otpor plastičnoj deformaciji, dakle povećan k_f, N/mm^2, što ima utjecaj i posljedice na oblikovljivost.

Osim toga, na granici zrna mogu se nalaziti mikrošupljine nastale pri kristalizaciji, kao i primjese u obliku lako topljivih eutektika koji slabe vezu između zrna. Na taj način metal u graničnim slojevima može imati veći ili manju čvrstoću u odnosu na samo zrno, zavisno od stanja rešetke, prisutnosti mikrošupljina i primjesa.

Različita orijentacija ravnina klizanja u zrnima polikristala (slika 8.), a shodno tome i različita veličina elastične deformacije koja odgovara početku plastične deformacije pojedinih zrna, dovodi pri rasterećivanju do pojave zaostalih naprezanja.



Slika 8. *Zrna polikristala sa različito orijentiranim ravninama klizanja [18].*

2.4. Proces rekristalizacije

Kako je prethodno navedeno, karakteristika oblikovanja deformiranjem u hladnom stanju jest pojava očvršćenja praćenog zaostalim naprezanjima. Ukoliko se deformiranje obavlja na povišenim temperaturama, uvjeti za nastajanje očvršćenja se mijenjaju. Povišena temperatura također dovodi i do promjena u metalu koji je prethodno bio deformiran u hladnom stanju.

Kristali metala poslije oblikovanja deformiranjem u hladnom stanju znatno su deformirani, a međuatomska ravnoteža u njima prisilno je poremećena. Uvjeti za uspostavu prvobitne ravnoteže pri normalnoj temperaturi praktično ne postoje zbog

male mogućnosti pomicanja i novog razmještanja atoma. U zagrijanom metalu, međutim, povećane su amplitude osciliranja atoma oko njihovih ravnotežnih položaja, uslijed čega postoji veća mogućnost postizanja unutrašnje ravnoteže u atomskim rešetkama, odnosno u kristalima.

Prema tome, ako se hladno deformirani metal zagrije do određenih temperatura, u njemu će se početi odvijati promjene u smislu približavanja ravnoteži, odnosno uklanjanja posljedica hladnog očvršćivanja. Ukoliko te temperature nisu jako visoke, doći će uglavnom do smanjenja elastičnih deformacija kristala, odnosno do smanjenja izobličenosti kristalnih rešetki. Zbog toga će doći do redukcije zaostalih naprezanja u metalu, a može se očekivati i manje povećanje oblikovljivosti kao i smanjeni otpor deformaciji. Pri tome veličina i oblik zrna, kao i karakteristična tekstura hladno deformiranog metala, ostaju nepromijenjeni. Ta pojava naziva se oporavak. Temperatura oporavka zavisi o vrsti metala. Smatra se da ona za čiste metale iznosi (0,25-0,30)T, ℃, gdje je T, ℃, temperatura taljenja. Oblikovanje deformiranjem na ovoj temperaturi ne bi spriječilo pojavu očvršćenja.

Na temperaturama višim od temperature oporavka dolazi do kvalitativno drugačijeg procesa – rekristalizacije. Ona se sastoji u nastajanju i rastu potpuno novih zrna u metalu, umjesto deformiranih. Ova mogućnost uvjetovana je postojanjem dovoljno velike pokretljivosti atoma, odnosno energije za njihovo veće pregrupiranje. Kao centri kristalizacije novih zrna pojavljuju se oni elementarni kristali koji u toku procesa deformiranje nisu jako izobličeni, a zatim se oko njih formiraju nove pravilne kristalne rešetke, sve dok se takav rastući kristal ne sudari sa kristalima koji su počeli rasti iz susjednih centara kristalizacije. Na taj način nastaju potpuno novi kristaliti (zrna).

Pri tome se može govoriti o dva slučaja. U prvom slučaju je u pitanju metal koji je prethodno deformiran u hladnom stanju, a zatim izložen rekristalizacijskom žarenju. U drugom slučaju radi se o oblikovanju deformiranjem u toplom stanju.

U prvom se slučaju rekristalizacijom uklanjaju orijentirana struktura, unutrašnja naprezanja i sve ostale posljedice hladnog očvršćivanja materijala i povećava plastičnost. Ovaj je slučaj važan za daljnje razmatranje provedenog eksperimentanog istraživanja. Ovo ima veliko praktično značenje budući da se često oblikovanjem u hladnom stanju raspoloživa oblikovljivost gotovo posve iscrpi, tako da eventualno

daljnje oblikovanje deformiranjem postaje nemoguće. Zahvaljujući rekristalizaciji, oblikovljivost se može povratiti u znatnoj mjeri.

Važno je naglasiti da veličina novonastalih zrna ovisi o stupnju ostvarene deformacije, temperaturi rekristalizacije i vremenu rekristalizacijskog žarenja. Određeni stupanj deformacije (koji je obično manji od 10%) uvjetuje pri naknadnoj rekristalizaciji nastajanje vrlo krupnih zrna. On se naziva kritičnim stupnjem deformacije.

Inače, rekristalizacija se u potpunosti može obaviti samo na temperaturama koje su više od temperature početka rekristalizacije. Ta temperatura je općenito određena kao aT_t (T_t ,℃ – temperatura taljenja), gdje koeficijent a ovisi o čistoći metala. Za čiste metale ova temperatura iznosi približno $0{,}4T_t$, pa je temperatura rekristalizacije [19, 20]:

$$T_r \geq 0{,}4T_t \text{ , ℃} \tag{7}$$

Legure obično imaju višu temperaturu početka rekristalizacije.

S obzirom na osnovne karakteristike oblikovanja metala deformiranjem u hladnom stanju i u toplom stanju, temperaturu početka rekristalizacije treba smatrati fizikalnom granicom između toplog i hladnog deformiranja.

3. OSNOVNE PRETPOSTAVKE MIKROOBLIKOVANJA

3.1. Definicija mikrooblikovanja

U posljednje vrijeme trend smanjenje veličina proizvoda na mikrodimenzije postaje vrlo izražen u mnogim granama industrije, posebno u polju komunikacijskih tehnologija, tehnologija mikro sustava (micro system technology MST) i mikro elektromehaničkih sustava (microelectromechanical system MEMS), itd. Kao posljedica tog trenda, a na temelju brojnih istraživanja, dolazi do ubrzanog razvoja tehnologija mikrooblikovanja metalnih materijala koje poprimaju izvrsne karakteristike kao što su: velika proizvodnost, visoka preciznost, visoki stupanj djelovanja, kratki proizvodni ciklus, niski troškovi proizvodnje, čisti pogon itd. Tehnološka pozadina konvencionalnih procesa oblikovanja deformiranjem pruža vrlo dobru osnovu razumijevanju i razvoju novih procesa. Promišljani tehnološki podaci i praktične mjerne metode konvencionalnih procesa oblikovanja akumulirali su se tijekom stotina godina, a slijedni iskorak napravljen je razvojem simulacijskih metoda u području plastomehanike. Sve navedene stečevine bile su dobar početak za razvoj tehnologija mikrooblikovanja. Razvoj različitih mikro proizvodnih tehnika dovodi i do razvoja opreme potrebne za dotičnu tehnologiju kao što su to: kalupi, ukovnji, matrice, strojevi, mjerna oprema za praćenje tijeka procesa itd. Ipak, još uvijek je primjena podataka dobivenih o pojedinoj tehnologiji, iskustvenih formula i teorijskih analiza izazov u svakom novom proizvodnom procesu. Zbog toga je to ključna točka u snažnom razvoju tehnologija mikrooblikovanja.

U terminima tehnologije oblikovanja deformiranjem mikrooblikovanje je tehnologija proizvodnje vrlo malih metalnih izradaka kod kojih dimenzije funkcionalnih elemenata u najmanje dvije osi ne prelaze 2 mm [16, 21]. Primjeri izradaka proizvedenih procesom mikrooblikovanja prikazani su na slici 9.

Oblikovanje metala deformiranjem, pa tako i mikrooblikovanje prema literaturi može se podijeliti u tri osnovne podskupine: masivno oblikovanje, oblikovanje lima i oblikovanje profila.

Masivno mikrooblikovanje ima vrlo široku primjenu budući da se njime vrlo jednostavno dobiva izradak promjera nekoliko desetaka mikrometara, npr. rezanjem žice u malene valjke i njihovom ekstruzijom. Međutim rukovanje ovakvim komadima u prikladnom vremenu i s potrebnom preciznošću vrlo je ograničeno.

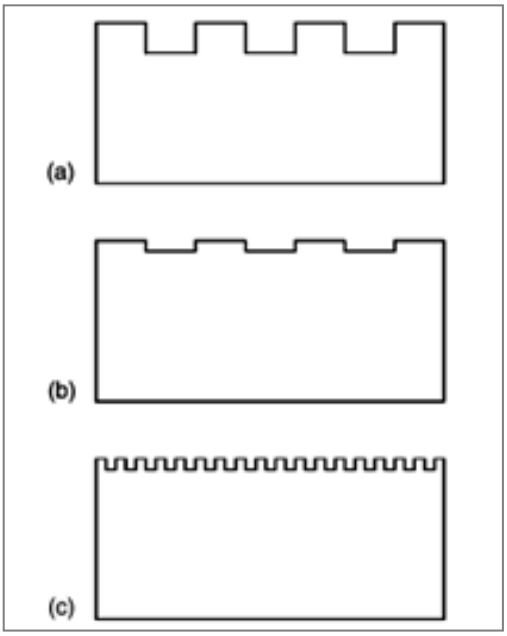
Mikrooblikovanje lima istražuje se u terminima slobodnog savijanja, savijanja uz pomoć lasera te dubokog vučenja lima najmanjih debljina od 0,1 mm.

Mikrooblikovanje profila je još uvijek vrlo slabo istraženo područje zahvaljujući činjenici da su za procese ove vrste potrebni visoko precizni strojevi i alati, puno zahtjevniji nego kod masivnog mikrooblikovanja. Primjer primjene mikrooblikovanja profila jest proizvodnja spirala savijanjem žice promjera 100μm. Strojevi specijalne namjene mogu također raditi i sa žicom najmanjeg promjera 60μm.



Slika 9. *Neki od proizvoda dobivenih procesom mikrooblikovanja u hladnom stanju [13].*

Navedenoj podjeli postupaka mikrooblikovanja potrebno je dodati još jedan, a to je mikrooblikovanje površine. Mikrooblikovanje površine spada u procese kovanja, ali se dimenzije izratka u svojoj strukturi bitno razlikuju od klasičnog procesa kovanja. Ove razlike prikazane su shematski na slici 10., a obuhvaćaju: klasični proces kovanja, klasični proces plitkog gravurnog kovanja i proces plitkog gravurnog kovanja površinske mikrogeometrije.



Slika 10. *Shematski prikaz oblika proizvoda kod tri stupnja procesa kovanja: a) Klasično kovanje, b) Klasično plitko gravurno kovanje, c) Plitko gravurno kovanje površinske mikrogeometrije [6].*

3.2. Pristup utjecaju veličine kristalnog zrna s aspekta mikrooblikovanja

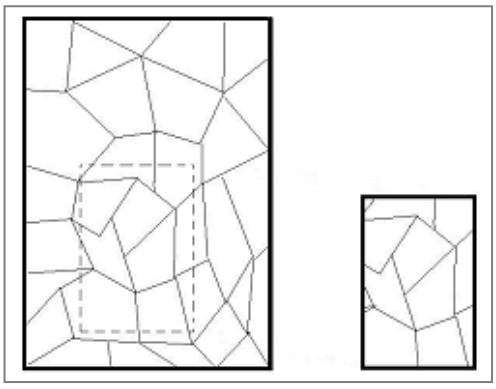
U tehnologiji oblikovanja deformiranjem najvažniji parametar koji opisuje ponašanje materijala jest naprezanje plastičnog tečenja budući da ta veličina, specifična za materijal, uvjetuje sile potrebne za proces oblikovanja, opterećenja na alatima, lokalno tečenje i popunjavanje gravure alata. Smanjivanjem veličine obratka standardni testovi korišteni za mjerenje tečenja materijala otkrivaju postojanje izrazitog utjecaja veličine obratka: smanjivanjem veličine obratka uočava se smanjivanje nagiba krivulje plastičnog tečenja. Ovaj efekt potvrđen je kroz nekoliko znanstvenih radova za različite materijale:

- U području oblikovanja lima Kals je proveo vlačne testove na legurama CuZn15 i CuNi18Zn20, tipičnim za elektroničku proizvodnju. Kocarida ih je proveo na bakru, a Raulea na aluminiju. Picard i Michael izveli su testove hidrauličnog udubljivanja na limovima različite debljine od bakrene legure [13].
- Na području masivnog oblikovanja utjecaj dimenzija ispitnog uzorka na krivulju tečenja ispitivan je provođenjem tlačnih testova sa bakrom, CuZn15 i CuSn6,

smanjivanjem veličine obratka prema teoriji sličnosti. To znači da su sve dimenzije uzoraka i alata množene faktorom geometrijske sličnosti λ [9, 13].

Smanjena naprezanja mogu se objasniti takozvanim površinskim modelom: Zrna smještena na površini tlačnog ili vlačnog uzorka manje su ograničena u pogledu gibanja nego zrna unutar materijala. Dislokacije koje se kreću kroz zrna za vrijeme procesa deformiranja gomilaju se na granicama zrna, ali ne i na slobodnim površinama. Ovo dovodi do smanjenog očvršćavanja i smanjenog otpora deformiranju na površini zrna. Smanjivanjem veličine uzorka, ali nepromijenjenom mikrostrukturom, udio površinskih zrna raste, olakšano je tečenje materijala i smanjeno naprezanje plastičnog tečenja. Smanjeno naprezanje plastičnog tečenja vodi do nižih sila potrebnih za oblikovanje[6] u procesima oblikovanja u kojima je omogućeno nesmetano tečenje materijala.

Kod procesa koji se odvijaju unutar zatvorenog alata nema smanjenja sile oblikovanja. U takvim slučajevima dolazi čak do porasta sile uzrokovanog, među ostalim, ponajviše povećanim trenjem. Smatra se kako je povećana sila trenja uzrokovanja povećanjem kontaktne površine gdje površina alata dolazi u kontakt sa cjelokupnom površinom obratka. Pri tome izostaje i slobodna površina površinskih zrna.



Slika 11. *Utjecaj veličine obratka na omjer broja površinskih i unutarnjih zrna: Veliki obradak – zrna na površini/zrna u unutrašnjosti=17/16, mali obradak – zrna na površini/zrna u unutrašnjosti=9/2 [22].*

Ovako opisani utjecaj veličine kristalnog zrna može se ispitati i na drugi način. Naime, ako se dimenzije obratka drže konstantnima, a toplinskom obradom se mijenja veličina kristalnog zrna, postignuti rezultati identični su već opisanima. Pojedinačno

[6] Smanjenje veličine sila oblikovanja veće je nego što bi se moglo očekivati s obzirom na smanjenje dimenzija. Faktor geometrijske sličnosti ne može se dovesti u vezu sa smanjenjem veličine parametara procesa. [16]

kristalno zrno, kod povećanja veličine zrna, također zauzima veći volumenski udio unutar tijela obratka, a isto tako povećava se i udio onih zrna koja graniče sa površinom. Dakle, analogno prethodnim zapažanjima, ako se povećava veličina kristalnog zrna, a dimenzije obratka se drže konstantnima, smanjuje se nagib krivulje plastičnog tečenja. Što su dimenzije obratka manje, to je ovo smanjenje značajnije. Upravo temeljena na toj analogiji vršit će se eksperimentalna istraživanja kojima će se ovaj rad baviti.

Dodatni efekti smanjivanja veličine obratka koji se odnose na materijal opisani su kod Kalsa: Normalna prosječna anizotropija lima smanjuje se minijaturizacijom. Nadalje, jednoliko istezanje (bez pojave vrata) smanjuje se minijaturizacijom, a također se smanjuje i istezanje nakon pojave vrata, a prije nastanka loma.

Sljedeći efekt koji je promatran i opisan u brojnim eksperimentima jest povećanje rasipanja veličina koje karakteriziraju tijek procesa smanjivanjem veličine uzorka. Razlog ovog efekta leži u slučajnoj orijentaciji i veličini pojedinačnog zrna što vodi do nehomogenog ponašanja materijala.

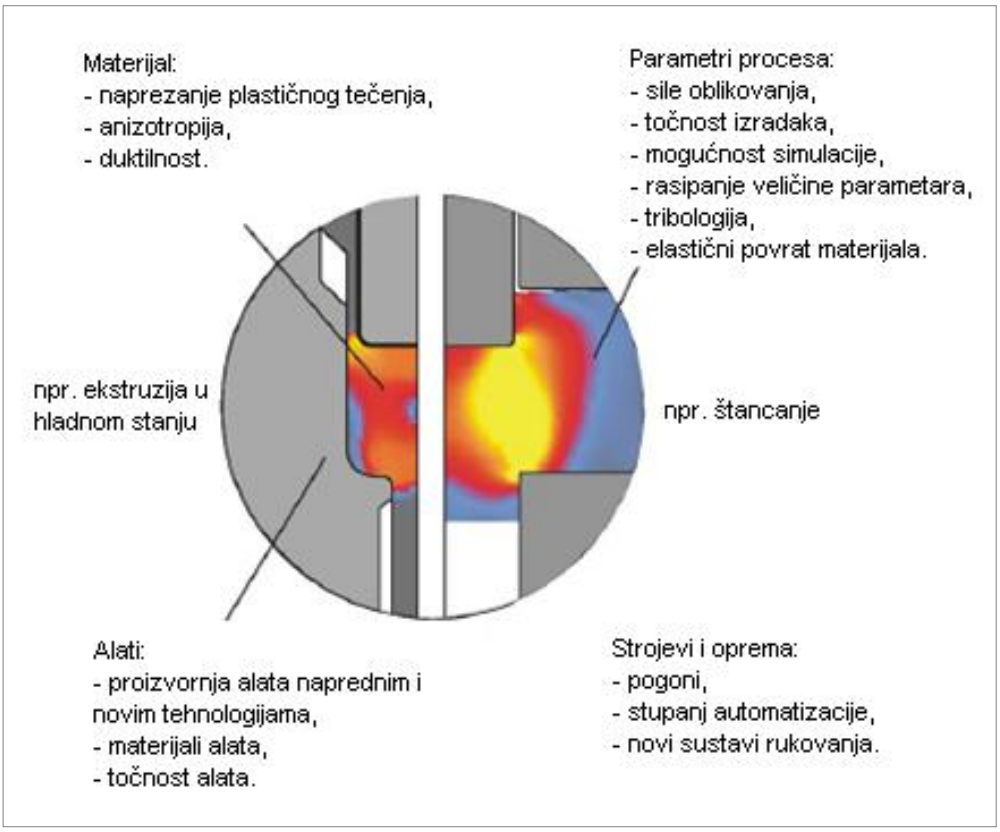
I na kraju paradoks koji su opisali Kals i Raulea [12]: Oba znanstvenika, nezavisno jedan od drugoga, proveli su pokuse savijanja uzoraka različite veličine zrna, različite debljine lima, različitih omjera debljine lima i veličine kristalnog zrna. Rezultati su pokazali da se sile tijekom procesa (u razmjeru sa veličinom uzorka) i vlačna čvrstoća materijala smanjuju minijaturizacijom iako omjeri debljina lima i veličina zrna rastu. Ipak, nakon što se dostigne određena vrijednost ovog omjera, sila ipak poraste. To znači da kada je samo jedno kristalno zrno smješteno po debljini lima, sila raste sa porastom veličine zrna. Ovakav rezultat u kontradiktornosti je s teorijom oblikovanja metala deformiranjem u konvencionalnim dimenzijama gdje se naprezanje plastičnog tečenja smanjuje sa porastom veličine kristalnog zrna (Hall-Petch-relation).

3.3. Utjecaj minijaturizacije na procese oblikovanja

Jednako kao i konvencionalni sustavi namijenjeni oblikovanju deformiranjem, tehnološki sustavi mikrooblikovanja sastavljeni su od materijala i alata. Ali osnovne karakteristike procesa mikrooblikovanja su utjecaji inducirani mikro-veličinom. Izvođenje procesa, strukturalni i fizikalni parametri konvencionalnog procesa ne mogu biti jednostavno usvojeni za potrebe procesa mikrooblikovanja te se prilikom njihova usvajanja moraju uzeti u obzir utjecaji minijaturizacije veličine obratka.

Općenito govoreći, takozvani utjecaji mikro-veličine su samo jedan dio u objašnjavanju mehanizma mikrooblikovanja materijala. Utjecaj veličine kod mikrooblikovanja je potpuno drugačiji od utjecaja veličine kod uobičajenih postupaka oblikovanja deformiranjem. Zbog toga bi bilo posve neprikladno promatrati mikrooblikovanje kao jednostavno smanjivanje veličina kod uobičajenih proizvodnih procesa. Dvije klase utjecaja mikro-veličine razlikuju se prema Geigeru [12]. Utjecaji koji se mogu objasniti (izračunati) koristeći slične veličine teorijom sličnosti ili objasniti podrazumijevajući određene konvencionalne modele (modeli koji se mogu analizirati ili modeli obrađeni metodom konačnih elemenata), a tretiraju se kao utjecaji veličine prvog reda. Druga skupina utjecaja veličine koji su dobiveni minijaturizacijom uzoraka, a ne mogu se izračunati i objasniti korištenjem konvencionalnih modela, tretiraju se (označeni su) kao utjecaji veličine drugog reda. Ova vrsta klasifikacije upotrebljava se za daljnju analizu procesa mikrooblikovanja.

U cilju boljeg razumijevanja efekata minijaturizacije sustav mikrooblikovanja se može podijeliti u četiri grupe: materijal obratka, proces oblikovanja, alati, strojevi i oprema kako je prikazano na slici 12.



Slika 12. *Utjecaji minijaturizacije na procese oblikovanja deformiranjem [23].*

U svakom od ovih područja potrebno je promotriti efekte minijaturizacije. Ponašanje materijala je pod utjecajem efekata smanjivanja veličine. Naprezanje plastičnog tečenja, anizotropija, duktilnost i maksimalna deformabilnost ovise o veličini uzorka i njegovoj mikrostrukturi, što se mora uzeti u obzir prilikom kreiranja procesa mikrooblikovanja. Proces oblikovanja je, naravno, strogo određen materijalom. Zbog toga efekti koji se odnose na materijal direktno utječu i na proces. Postoje također i dodatni efekti koji se tiču procesa, a to su: sile oblikovanja, trenje, elastični povrat, rasipanje rezultata i kao posljedica točnost proizvedenih dijelova. Potrebno je naglasiti da efekti koji se tiču materijala i procesa također utječu i na upotrebljivost FEM simulacija procesa.

U pogledu obradnih sustava u području mikrooblikovanja, glavni problem leži u proizvodnji visoko preciznih alata i dostupnosti adekvatnih alatnih strojeva za operacije mikroobrade.

a) Utjecaj dimenzija obratka na stanje materijala

   U uobičajenim prilikama sve vrste i stanja materijala evaluiraju se tipičnim veličinama (čvrstoća, krutost, anizotropija, stanje deformacije) koje nam daju dovoljnu informaciju za konvencionalne procese oblikovanja deformiranjem. Na taj način možemo zaključiti o mogućem ponašanju materijala u složenim uvjetima oblikovanja. Međutim, kod oblikovanja materijala u mikroveličini, utjecaj oblika i stupnja deformacije obratka na mikrostrukturu ima puno veći utjecaj na ukupno ponašanje mikroobratka tijekom procesa deformacije. Ova situacija nadilazi hipotezu da je materijal homogeni kontinuum. Čak i kod vrlo jednostavnog opterećivanja jasno se vidi različitost mikroveličina od makroveličina. Koliko se može vidjeti, utjecaji mikroveličine su u suprotnosti sa zakonima deformiranja[7]. Ove suprotnosti u svim tipičnim testovima provedenim na mikroveličini su potpuno drugačije od onih provedenih na makroveličini zahvaljujući promjeni fizikalnih, kemijskih ili geometrijskih

[7] Odnosi se na *zakon sličnosti* [20] koji ustanovljava na osnovi deformacije podudarnost dvaju tijela različitih dimenzija ako su tijela geometrijski i fizički slična, a postupak deformacije obavljen u određenim uvjetima. Model (m) redovito manjih dimenzija i tijelo stvarnih dimenzija (s) bit će izloženi jednakim naprezanjima koja su deformaciju izazvala. Deformacijske sile se međutim odnose kao kvadrati, a deformacijski radovi kao kubovi odgovarajućih dimenzija ako su ispunjeni uvjeti sličnosti [14, 20]. Geometrijska sličnost definirana je postojanjem konstante sličnosti svih dimenzija, a fizička sličnost je definirana identičnim materijalom, temperaturnim režimom obrade, stupnjem deformacije i brzinom deformacije te trenjem.

svojstava samog materijala. Promatrani fenomeni u makrotestovima klasificirani su kao utjecaji mikroveličine na stanje materijala. Temeljni uzroci ove vrste utjecaja mikroveličine leže u utjecaju veličine i oblika kristalnog zrna na svojstva materijala u obratku mikrodimenzija. Npr. tlačni testovi na sobnoj temperaturi pokazali su da se vlačna čvrstoća i tlačna čvrstoća smanjuju sa smanjenjem veličine uzorka, a također i sa povećanjem veličine kristalnog zrna (Saotome 1994) [12]. Jednom riječju, utjecaji mikroveličine na stanje materijala su oni fenomeni koji se odnose na svojstva materijala pod specijalnim testnim uvjetima.

b) Utjecaj mikroveličine na procesne uvjete

Kod smanjenih dimenzija obratka, polje naprezanja i deformacija u trenutnom napregnutom stanju pri oblikovanju deformiranjem razlikuju se od onih dobivenih u standardnim procesima oblikovanja. Ove razlike postaju neugodnije kod kompliciranijih nelinearnih i topološki zahtjevnijih procesa prilikom mikrooblikovanja. To se naziva utjecajima veličine induciranima kompleksnošću i nelinearnošću rubnih uvjeta kod mikroveličina.

3.4. Teorija sličnosti u procjeni mikroveličinskih utjecaja

Cilj istraživanja mikroveličinskih utjecaja ne sastoji se samo u tome da se prikazuju različitosti svojstava materijala i procesnih uvjeta između mikrooblikovanja i klasičnog oblikovanja deformiranjem. Ono što više doprinosi složenosti razmatranja jest stupanj mikroveličinskih utjecaja na procese mikroolikovanja, a također i kako upotrijebiti tehnološke podatke, proračunske formule, metode simulacije itd. sa klasičnog oblikovanja deformiranjem na područje mikrooblikovanja. Dakle, glavni sadržaj istraživanja mikroveličinskih utjecaja na mikrooblikovanje postaje upravo sličnost između uobičajenih sustava i procesa oblikovanja i sustava i procesa mikrooblikovanja, a također i sličnost svojstava materijala i procesnih uvjeta između ova dva sustava. Na taj način, kada se generalizira koncept određivanja stupnja sličnosti prema teoriji sličnosti (Raulea 2001) [24], mogu se definirati koncepti različitost sličnosti i točnost sličnosti u cilju opisivanja mikrosusava.

Pretpostavimo da su *m* geometrijski faktori, a *n* negeometrijski faktori klasičnog uobičajenog sustava za oblikovanje deformiranjem A (ovdje se geometrijski faktori

principijelno odnose na geometrijske uvjete sustava za oblikovanje deformiranjem), te u odnosu na to imamo dva slučaja *M* i *N* [14]:

$$M = \{S_1, S_2, ..., S_m\} \tag{8}$$

$$N = \{T_1, T_2, ..., T_n\} \tag{9}$$

Sukladno tome, u nekom sustavu za mikrooblikovanje postoje *m* geometrijski faktori i *n* negeometrijski faktori. Sustav je označen sa $\bar{A}$. Odnosni slučajevi su $\overline{M}$ i $\overline{N}$:

$$\overline{M} = \{\overline{S}_1, \overline{S}_2, ..., \overline{S}_m\} \tag{10}$$

$$\overline{N} = \{\overline{T}_1, \overline{T}_2, ..., \overline{T}_m\} \tag{11}$$

Pustimo li da sličan omjer geometrijskih faktora ostane nepromjenljiv, npr. određuje se stupanj sličnosti r_L, dobiva se sljedeći izraz:

$$\frac{\overline{S}_1}{S_1} = \frac{\overline{S}_2}{S_2} = ... = \frac{\overline{S}_m}{S_m} = r_L \tag{12}$$

U sustavima za oblikovanje deformiranjem negeometrijski faktori uključuju parametre koji opisuju svojstva materijala, sile i naprezanja, koeficijente redukcije, faktore trenja, itd. Prema fizikalnim i kinematskim zakonima, ovi faktori mogu se klasificirati kao nepromjenljivi faktori i kao varijable sličnosti, gdje su nepromjenljivi faktori geometrijski ili fizikalni faktori koji fluktuiraju u mikroskali i u međuvremenu moraju ostati konstantni prema teorijama klasičnih postupaka oblikovanja. To su npr. vlačna čvrstoća i granica tečenja. Varijabilni faktori su tehnološki parametri koji se obavezno moraju mijenjati za različite veličine geometrije čak i prema zakonima klasičnog oblikovanja deformiranjem. To su npr. sila žiga, sila probijanja (štancanja), sila vučenja, sila tlačnog prstena itd.

Ako se pridruži stupanj sličnosti negeometrijskim sličnim veličinama za slične sustave mikrooblikovanja, dobije se sljedeći izraz [14]:

$$\frac{\overline{T}_{\bar{i}}}{T_i} = r_{Ti} \tag{13}$$

Sada možemo definirati koeficijente razlike i podudaranja sličnosti kao:

$$\varphi_i = r_{Ti} - r_L^k \tag{14}$$

$$\Phi_i = \frac{r_{Ti} - r_L^k}{r_L} \tag{15}$$

gdje su:

φ_i – koeficijent razlike

Φ_i – koeficijent podudaranja

k - eksponent geometrijskog stupnja sličnosti u izrazima stupnja sličnosti negeometrijskih faktora. Kad je negeometrijski faktor nepromjenljiv *k=0,* u ostalim

slučajevima *k* je označen kao pozitivni cijeli broj.

Prema veličini koeficijenta podudaranja možemo komentirati sljedeće:

$\Phi_i=0$ ukazuje na preciznu sličnost. Stupanj sličnosti ovog para negeometrijskih elemenata ekvivalentan je stupnju sličnosti geometrijskih elemenata.

$\Phi_i<0$ ukazuje na to da je stupanj sličnosti ovog para negeometrijskih elemenata manji nego kod geometrijskih elemenata i naziva se negativan efekt mikroveličine.

$\Phi_i>0$ ukazuje na to da je stupanj sličnosti negeometrijskih elemenata veći nego geometrijskih i naziva se pozitivan efekt mikroveličine.

Očito je da Φ_i opisuje odstupanje negeometrijskog stupnja sličnosti od geometrijskog stupnja sličnosti.

Promatrajući ukupnu sličnost sustava i različiti stupanj utjecaja na sličnost sustava, a predstavljajući težinske koeficijente $\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_n$, svih sličnih elemenata, možemo ispisati reprezentativni prikaz funkcije sličnosti sustava:

$$\psi = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \Phi_i \tag{16}$$

Prema veličini Ψ možemo komentirati sljedeće:

$\Psi=0$ ukazuje na to da je utjecaj mikroveličine sustava prema makro sustavu nepostojeća, a naziva se točna sličnost sustava ili kvazi točnost sličnosti sustava;

$\Psi<0$ ukazuje na to da je utjecaj mikroveličine sustava na onaj makrosustava manji nego odgovarajući geometrijski stupanj sličnosti i naziva se negativnim mikroveličinskim efektom sustava;

$\Psi>0$ ukazuje na to da je utjecaj mikroveličine sustava na onaj makroveličine veći nego odgovarajući geometrijski stupanj sličnosti i naziva se pozitivnim mikroveličinskim efektom sustava.

3.5. Problemi kod procesa mikrooblikovanja

Znanje kojim se trenutno raspolaže, vezano uz procese mikrooblikovanja ponajviše je temeljeno na tzv. internom iskustvu pojedinih proizvođača ili istraživača dobivenom metodom pokušaja i pogreške. U većini slučajeva pojavljuje se smanjenje ponovljivosti postignutih parametara procesa paralelno sa stupnjem minijaturizacije. Među ostalim efektima smanjivanja dimenzija pojavljuju se tri najčešća:

(I) Opadanje geometrijske točnosti.

(II) Smanjivanje veličine naprezanja plastičnog tečenja.

(III) Povećanje rasipanja veličine naprezanja plastičnog tečenja vezano za geometriju izratka.

Ovi fenomeni često su povezani sa dominantnim utjecajem pojedinačnog kristalnog zrna unutar volumena izratka ili nekog dijela izratka, budući da je smanjivanjem dimenzija zahvaćena samo geometrija alata i obratka, ali ne i mikrostruktura materijala.

U tablici 1 su prikazani do sada prijavljeni efekti minijaturizacije kod različitih postupaka testiranja materijala od strane priznatih svjetskih znanstvenika.

Uobičajeni procesi oblikovanja deformiranjem omogućavaju valjanu proizvodnju vrlo velikog broja sitnih komponenti uz vrlo nisku cijenu i dobru ponovljivost. Kako bi se ova prednost osigurala i u proizvodnji mikrodijelova, vrlo je bitno postići što bolje razumijevanje relevantnih utjecajnih faktora.

Već je spomenuto kako minijaturizacija procesa oblikovanja utječe na mijenjanje nekoliko različitih faktora. Promjena je rezultat smanjivanja dimenzija, vrste procesa oblikovanja i promjene u svojstvima materijala.

Kako se veličina obratka smanjuje prema mikro-veličini, tako rastu zahtjevi za što preciznijim alatima, a tečenje materijala mijenja se u odnosu prema makro-veličini. Ključni problemi odnose se na topografiju površine i na veličinu zrna koji nisu pod utjecajem smanjenja dimenzija. Topografija utječe na tribološka svojstva, a veličina zrna utječe na svojstva materijala.

Tablica 1: Problemi kod procesa mikrooblikovanja zabilježeni u literaturi [22].

Materijal	Izvršeno testiranje	Efekt	Izvor
Al, Cu, Cu-13 u% Al, Fe	Vlačni test	Smanjenjena čvrstoća	Miyazaki i Fujita (1978), Miyazaki i suradnici (1978, 1979)
CuZn15	Tlačni test	Smanjenjena čvrstoća, povećano rasipanje parametara procesa	Engel i Eckstein (2002)
Sn, Sn legure	Vlačni test	Smanjenjena čvrstoća	Pell-Wapole (1943)
CuZn, Al	Vlačni test	Smanjenjena čvrstoća, povećano rasipanje parametara procesa	Gau i suradnici (2007)
CuZn, Al	Savijanje	Smanjenjena čvrstoća (zrna manja od debljine folije), povećanje čvrstoće (zrna veća od debljine folije), povećano rasipanje parametara procesa	Gau i suradnici (2007)
Al	Savijanje	Smanjenjena čvrstoća (zrna manja od debljine folije), očvršćenje (zrna veća od debljine folije), povećano rasipanje parametara procesa	Raulea i suradnici (1999)

3.6. Plitko gravurno kovanje

3.6.1. Definicija i podjela procesa plitkog gravurnog kovanja

Ovim oblikovanjem na površinama radnog komada formiraju se različita uzvišenja i udubljenja, odnosno izražen reljef. Podjela plitkog gravurnog kovanja može se izvršiti na sljedeći način [25]:

1. Plitko gravurno kovanje sa istovremenom promjenom ukupne debljine (visine) radnog komada (tzv. masivno plitko gravurno kovanje) - npr. kod izrade medalja i sl. Pri tome se reljef gravure nalazi samo s jedne strane alata dok je drugi dio alata ravna ploha.
2. Plitko gravurno kovanje bez primjetne promjene debljine radnog komada. Ono se nadalje može podijeliti na:
   (a) Oblikovanje sa čvrstim nalijeganjem alata na materijal – npr. kod oblikovanja ornamenata u proizvodnji nakita i slično.
   (b) Oblikovanje bez čvrstog nalijeganja alata na materijal – npr. kod oblikovanja ojačavajućih rebara i sličnih oblika na limu. Tada nasuprot udubljenju s jedne strane materijala nastaje odgovarajuće uzvišenje sa druge strane, a materijal nije jače tlačen s obje strane površinama alata.
   (c) Izrada gravura i natpisa (kada je dubina reljefa relativno mala u usporedbi sa masivnim plitkom gravurnim kovanjem.

3.6.2. Sila i rad

Potrebna sila plitkog gravurnog kovanja računa se iz općeg odnosa [25]:

$$F_{max} = Ap_{max}\ ,\ \text{N} \tag{17}$$

gdje je p_{max} , N/mm^2 - maksimalni radni pritisak. Načelno se može reći da sa smanjivanjem debljine materijala raste radni pritisak.

Rad kod plitkog gravurnog kovanja izračunava se iz:

$$W = \bar{F}h,\ \text{J} \tag{18}$$

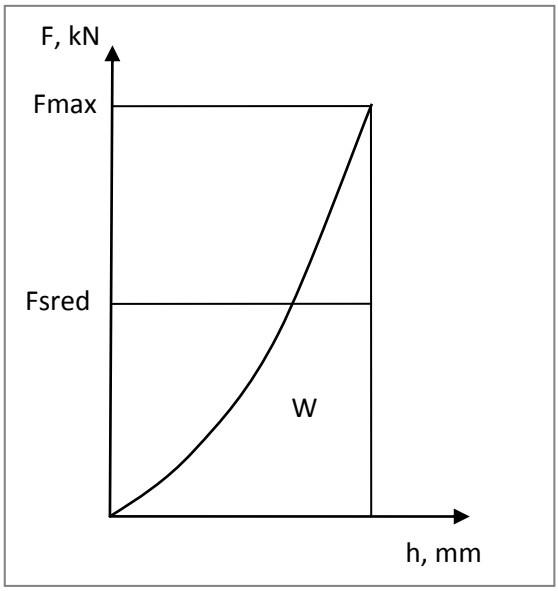
Gdje je $\bar{F}$, N - srednja sila, h , mm- radni hod žiga.

S obzirom na dijagram sila – radni hod pri ovoj vrsti oblikovanja ne odstupa puno od ravne linije pa se može smatrati da je:

$$\bar{F} \approx F_{max}/2\ ,\ \text{N} \tag{19}$$

odnosno:

$$W \approx \frac{F_{max} h}{2} \ , \ \text{J} \qquad (20)$$



Slika 13. *Dijagram sila – radni hod kod plitkog gravurnog kovanja [25].*

Pri masivnom plitkom gravurnom kovanju može se uzeti da je:

$$h = \frac{V_{gr}}{A_{gr}} \ , \ \text{mm} \qquad (21)$$

gdje je: V_{gr} ,mm^3 - volumen materijala u gravuri, a A_{gr} , mm^2– površina projekcije reljefa.

4. PLAN POKUSA I TEHNIKA PROVEDBE EKSPERIMENTA

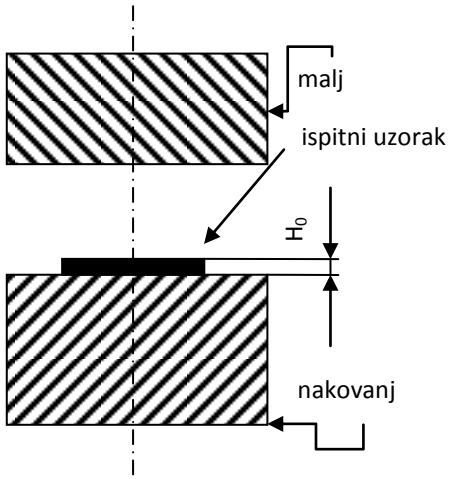
Provedeno eksperimentalno istraživanje podijeljeno je u dva dijela. Prvi dio odnosi se na mjerenje veličina procesa tijekom slobodnog kovanja, a drugi dio na mjerenje veličina procesa tijekom kovanja u gravuri ukovnja. Pri tome je gravurom ukovnja djelomično ograničeno tečenje materijala. Praćenjem međuodnosa istih veličina želi se pokazati njihovo različito ponašanje u različitim uvjetima tečenja – slobodno tečenje i ograničeno tečenje. Navedeno oprečno ponašanje veličina procesa u ovakvim uvjetima tečenja tipično je za sve procese mikrooblikovanja kako je opisano u trećem poglavlju. Time bi se plitko gravurno kovanje nesumnjivo svrstalo u procese mikrooblikovanja. Potrebno je napomenuti kako su određene veličine procesa (sila oblikovanja i ukupna deformacija), koje se prate tijekom eksperimentalnog istraživanja, u jednom slučaju ulazne, a u drugom izlazne varijable. To se događa zbog različitih mogućnosti mjerenja u različitim uvjetima. Međutim, budući da je bitan samo ukupan međuodnos svih promatranih veličina procesa, ova „promjena mjesta“ gubi na značaju.

4.1. Planiranje pokusa slobodnog kovanja

Kako bi se pokazao značajan utjecaj veličine kristalnog zrna na parametre procesa bit će izvršena mjerenja ukupne promjene visine i elastičnog povrata materijala ispitnih uzoraka - rondele početne visine 2 mm i promjera 20 mm, slobodno sabijanih različitim iznosima sila. Korišteni ispitni uzorci načinjeni su od materijala identičnog kemijskog sastava Al 99,5, ali različite veličine kristalnog zrna.

Nadalje, korištenjem dobivenih rezultata i naknadnim mjerenjem sabijenih površina tretiranih uzoraka, odredit će se maksimalni specifični pritisak u zavisnosti o logaritamskom stupnju deformacije za različite veličine kristalnog zrna.

Pojednostavljena shema korištenog alata za slobodno kovanje prikazana je na slici 14. Alat je u osnovi vrlo jednostavan i sastoji se od dva osnovna dijela: malja i nakovnja, čije su radne površine međusobno paralelne. Deformacija se ostvaruje relativnim gibanjem malja prema nakovnju.



Slika 14. *Shematski prikaz korištenog alata za slobodno kovanje.*

4.1.1. Cilj provođenja pokusa i odabir utjecajnih faktora

Cilj provođenja navedenih eksperimenata jest utvrditi utjecaj veličine kristalnog zrna materijala na elastični povrat materijala obratka nakon prestanka djelovanja sile oblikovanja. U prvom dijelu eksperimentalnog istraživanja radi se o procesu slobodnog kovanja što znači da je omogućeno slobodno radijalno tečenje materijala. Budući da se radi o ispitnim uzorcima vrlo male visine ovaj elastični povrat mogao bi iznositi veliki postotak od ukupne deformacije materijala. Stoga je potrebno mjeriti i ukupnu deformaciju za svaki pojedini slučaj. Kako povećanjem veličine kristalnog zrna pojedinačno zrno zauzima značajniji udio u ukupnom volumenu ispitnog uzorka, koji je malih dimenzija, očekuje se značajna promjena izlaznih veličina – ukupne deformacije i elastičnog povrata. Ovakvo ponašanje mjerenih veličina ukazalo bi na proces mikrooblikovanja.

Budući da se proces slobodnog kovanja odvija korištenjem hidraulične preše na kojoj je moguće precizno odrediti maksimalnu silu oblikovanja, ta maksimalna sila oblikovanja biti će prva ulazna varijabla, odnosno prvi utjecajni faktor. Definirane veličine maksimalnih sila, a koje uvjetuju različite stupnjeve deformacije, kretat će se od 50 do 400 kN u koraku od 50 kN. Drugi utjecajni faktor bit će veličina kristalnog zrna ispitnog uzorka. Toplinskom obradom materijala dobivene su tri različite veličine kristalnog zrna: 39 μm, 47 μm i 76 μm.

Tijekom provođenja eksperimenta brzina deformacije držat će se konstantnom i iznosit će 0,012 mm/s. Zbog toga se njezin utjecaj na izlazne varijable zanemaruje. Također, sva mjerenja za pojedinačnu veličinu kristalnog zrna obavljaju se u istom danu i vrše ih isti mjeritelji čime je utjecaj mjeritelja i brzine deformacije također zanemaren.

Može se uočiti da je kod ovakvih eksperimenata pretpostavljeno zasnivanje zavisnosti rezultata o samo dva faktora idealizacija. Svakako je moguće navesti još niz faktora o kojima bi rezultat mogao ovisiti. Ovakva idealizacija opravdana je pod određenim uvjetima [26]:

(1) Ako se faktori koji nisu uzeti u obzir zadržavaju na konstantnom nivou.

(2) Ako je utjecaj neobuhvaćenih faktora zanemarivo malen.

(3) Ako je utjecaj neobuhvaćenih faktora slučajan pa se metodama matematičke statistike njihovo djelovanje može odvojiti od djelovanja kontroliranih faktora u vidu greške eksperimenta.

U obrađivanom slučaju sa velikom sigurnošću moguće je pretpostaviti kako je zadovoljen prvi i/ili treći uvjet kod svih eventualnih neobuhvaćenih faktora. Pri tome se misli na faktore kao što je npr. utjecaj mjeritelja, temperature, stroja pomoću kojeg se proces oblikovanja izvodi itd.

4.1.2. Odabir izlaznih varijabli i faktorskog plana pokusa

Izlazne varijable, odnosno mjerene veličine bit će napose ukupna deformacija i elastični povrat materijala obratka nakon rasterećenja. Budući da se ukupna deformacija ne može precizno zadati kao ulazna veličina, ona će biti mjerena kod maksimalne sile deformiranja. Elastični povrat nastupa nakon rasterećenja. Obje veličine – i deformacija i elastični povrat, bit će iskazane u mikrometrima.

U opisanom eksperimentalnom istraživanju definirana su dva faktora čiji nas utjecaj na dvije izlazne veličine interesira.

Određeni tipovi faktorskih pokusa pokazali su se vrlo korisnima pri razvoju procesa i njihovim poboljšanjima. Jedan od njih je i faktorski pokus s k faktora, svaki na dvije razine. Svaki od provedenih pokusa se sastoji od 2^k izvođenja i zbog toga se ti pokusi nazivaju 2^k faktorski pokusi. Ovi pokusi imaju jako pojednostavljenu analizu i često služe kao osnova za druge tipove pokusa.

Najjednostavniji oblik 2^k pokusa je 2^2 – dva faktora A i B, svaki na dvije razine. Ovaj plan pokusa izabran je za eksperiment i analizu ovog istraživanja.

Tablica 2. Plan pokusa eksperimentalnog istraživanja slobodnog kovanja.

		Veličina kristalnog zrna, μm	
		Min	**Max**
		39	**76**
Sila oblikovanja, kN		**…**	**…**
Min	**50**	**…**	**…**
Max	**400**	**…**	**…**

4.1.3. Provođenje eksperimenta

4.1.3.1. Toplinska obrada uzoraka

Budući da su ispitni uzorci štancani iz valjanog aluminijskog lima, toplinska obrada izvršena je kako u cilju variranja veličine kristalnog zrna, tako i u cilju uklanjanja usmjerene strukture, očvrsnuća materijala i zaostalih naprezanja nastalih prethodnim hladnim oblikovanjem – valjanjem lima.

Prema dva literaturna izvora odabrani su režimi toplinske obrade.

D. Krumes (Toplinska obrada) [27] preporuča rekristalizacijsko žarenje u cilju omogućavanja daljnjeg hladnog oblikovanja već deformiranih i očvrsnutih proizvoda. Također rekristalizacijskim žarenjem omogućava se usitnjavanje kristalnog zrna. Za aluminij se preporuča temperatura žarenja između 300°C i 500°C u trajanju od 10 do 60 minuta. Naknadno ohlađivanje vrši se na zraku.

J. Davis (Aluminium and Aluminium Alloys) [28] preporuča rekristalizacijsko žarenja na temperaturi 350°C u trajanju 2 do 4 sata. Također, naknadno ohlađivanje se vrši na zraku.

Obzirom na navedene literaturne izvore odabrani su sljedeći režimi toplinske obrade prikazani u tablici:

Tablica 3. Režimi toplinske obrade ispitnih uzoraka.

Temperatura žarenja, °C	**Vrijeme žarenja, min**
350	120
450	30
450	120

Hlađenje ispitnih uzoraka izvršeno je na zraku.

Očekuje se dobivanje uzoraka različite veličine kristalnog zrna.

4.1.3.2. Analiza veličine kristalnog zrna

Analiza veličine kristalnog zrna provedena je na mikroskopskim fotografijama posebno pripremljenih ispitnih uzoraka. Toplinski obrađeni ispitni uzorci prolaze kroz sljedeće faze pripreme za analizu veličine zrna:

- Rezanje: poprečno rezanje uzoraka vrši se na Struers ACCUTOM-2 preciznoj rezalici sa Al_2O_3 reznom pločom.
- Zalijevanje u Durokit masu.
- Brušenje brusnim papirom različite granulacije: 220, 320, 500 i 800.
- Predpoliranje dijamantnom pastom DPMol veličine čestica 3µm.
- Završno poliranje - OP Chem suspenzija veličine čestica ¼ µm.
- Pranje – etilni alkohol.
- Sušenje u struji toplog zraka.



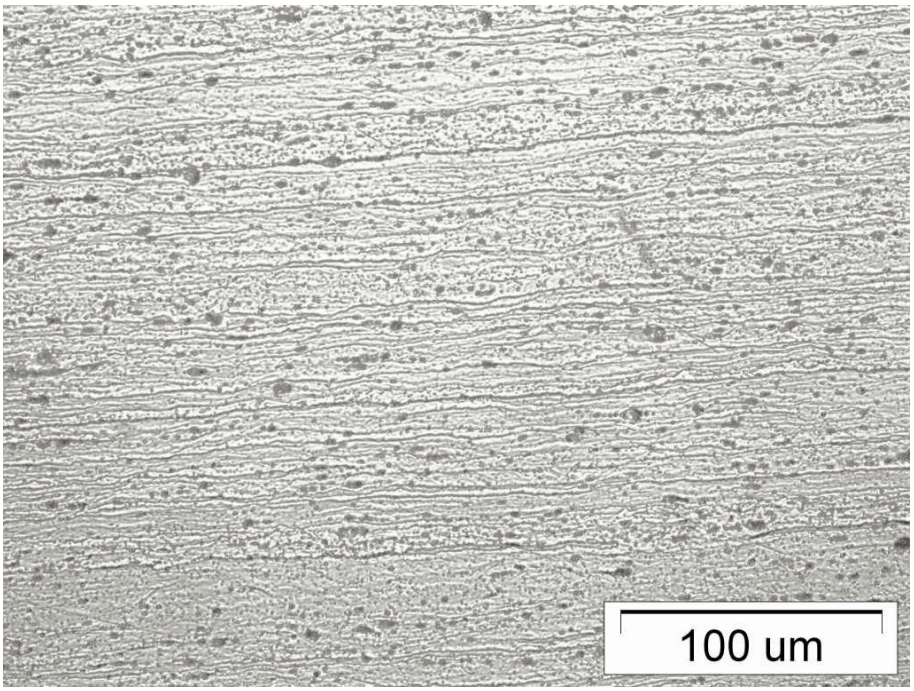
Slika 15. *Izrezani i obrađeni ispitni uzorci pripremljeni za daljnu mikroskopsku analizu mikrostrukture.*

Ovako pripremljeni uzorci (prikazani na slici 15) nagrizaju se tzv. Kellerovim reagensom u trajanju 30 s.

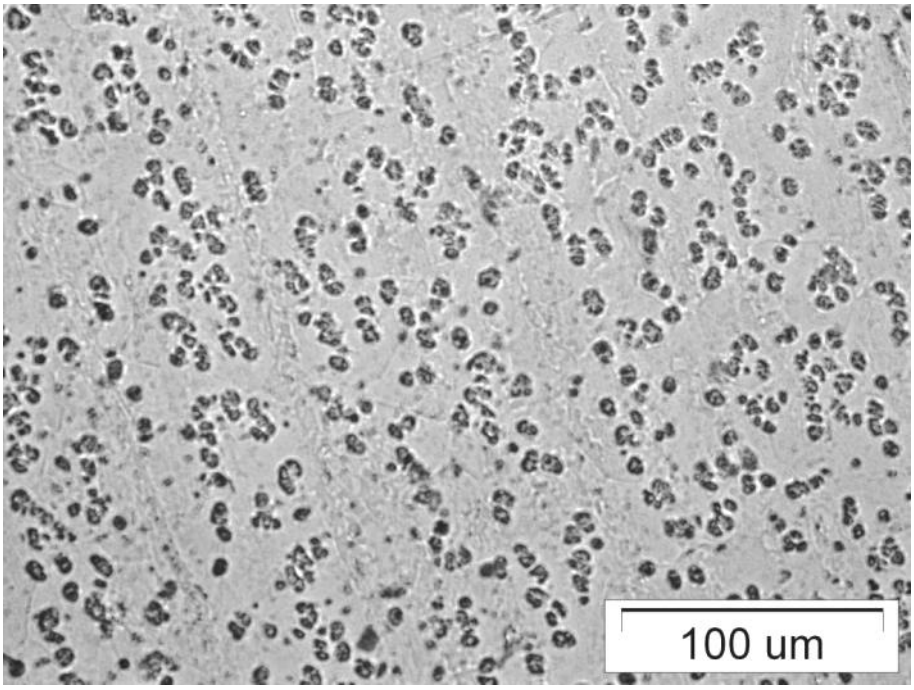
Sastav Kellerovog reagensa:

- 2 ml HF,
- 3 ml HCl,
- 5 ml HNO_3,
- 190 ml destilirane vode.

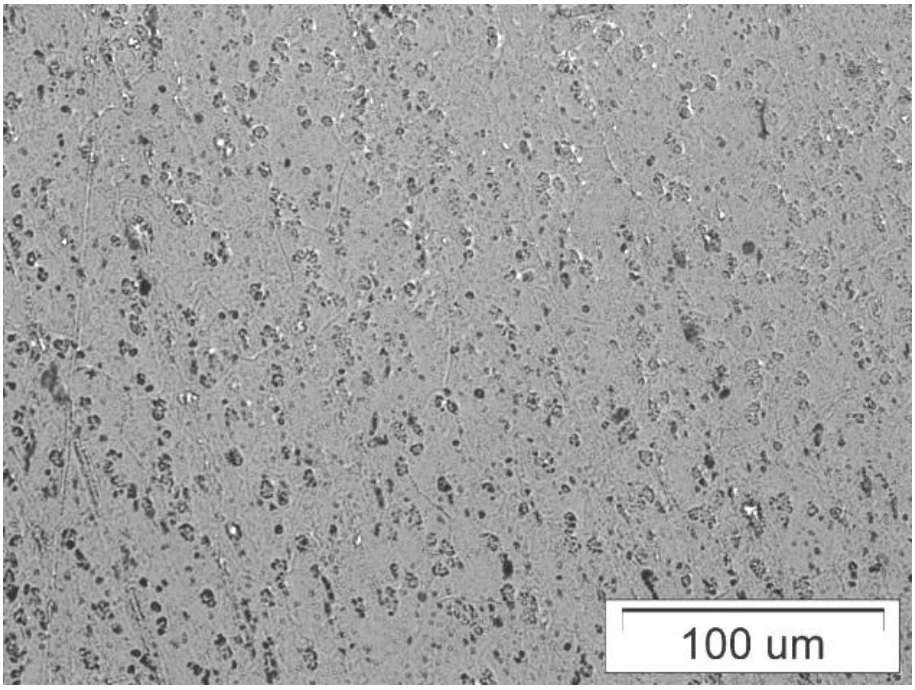
Nakon nagrizanja na površini uzoraka vidljiva je zrnata mikrostruktura. Mikrostruktura je promatrana svjetlosnom mikroskopom Olympus – GX51 (Inverted system metallurgical microscope), a dobivena slika računalno je obrađena i prilagođena za daljnju analizu, odnosno za mjerenje veličine kristalnog zrna. Fotografije površine prikazane su na slikama 16-22.



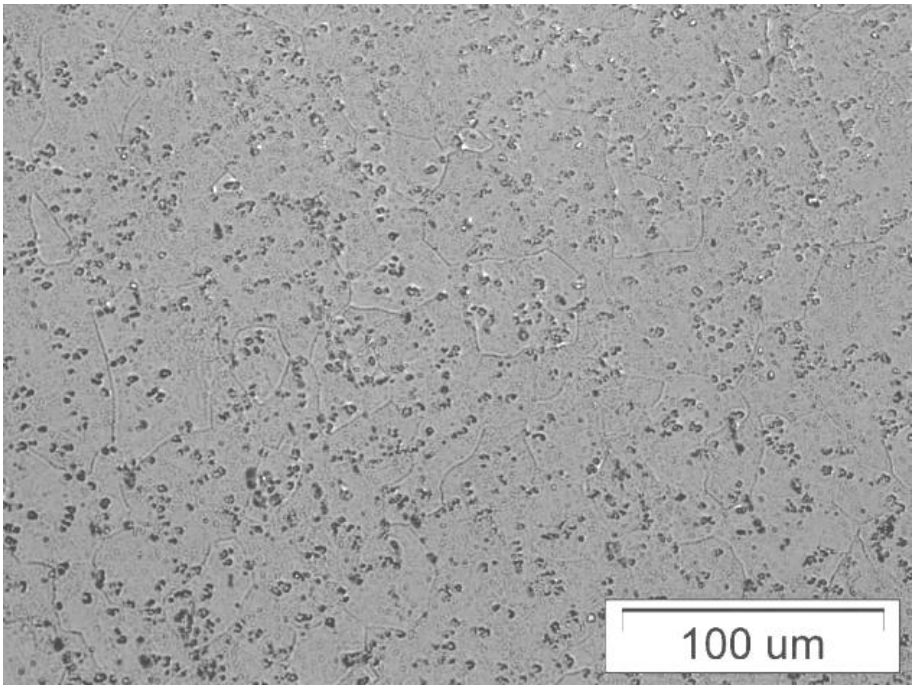
Slika 16. *Fotografija površine ispitnog uzorka u nabavnom stanju, prije provedene toplinske obrade. Vidljiva je izrazito usmjerena mikrostruktura nastala prethodnim procesom valjanja lima iz kojeg je uzorak izrezan.*



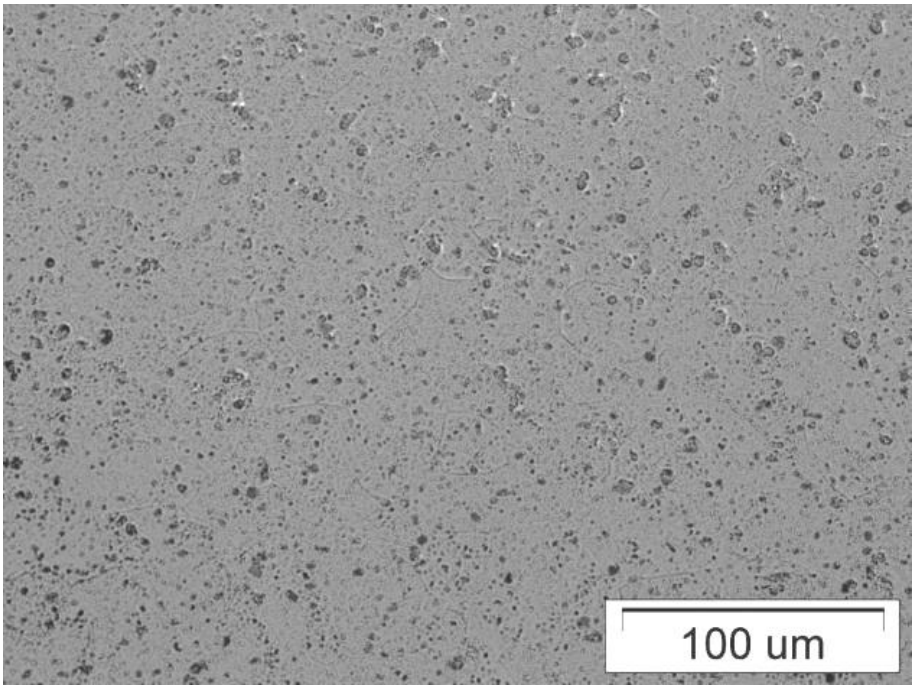
Slika 17. *Fotografija bazne površine uzorka dobivenog sljedećim režimom toplinske obrade: 450ºC – 2 sata.*



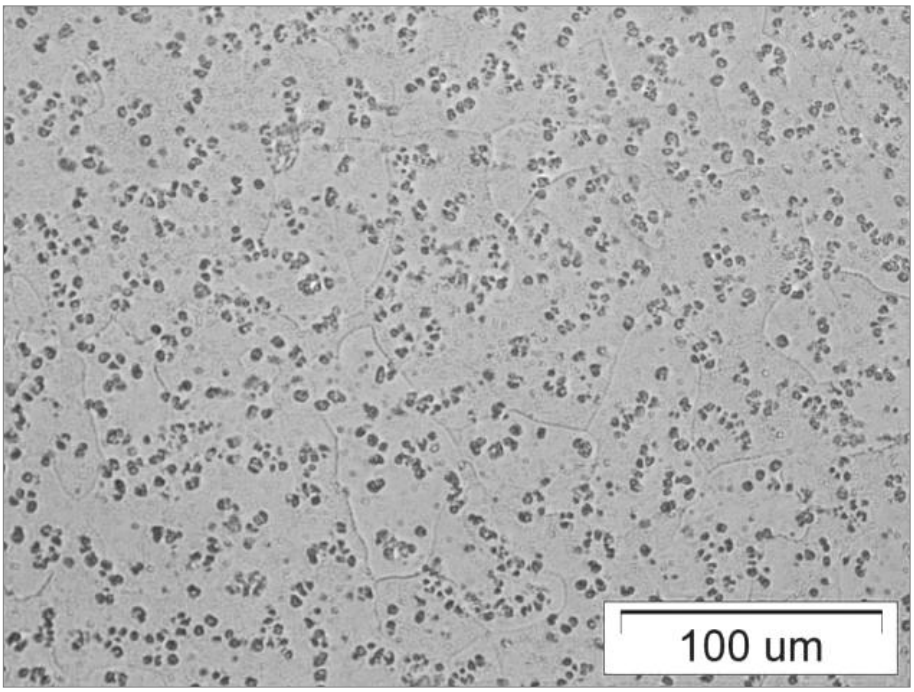
Slika 18. *Fotografija poprečno prerezane površine uzorka dobivenog sljedećim režimom toplinske obrade: 450ºC – 2 sata.*



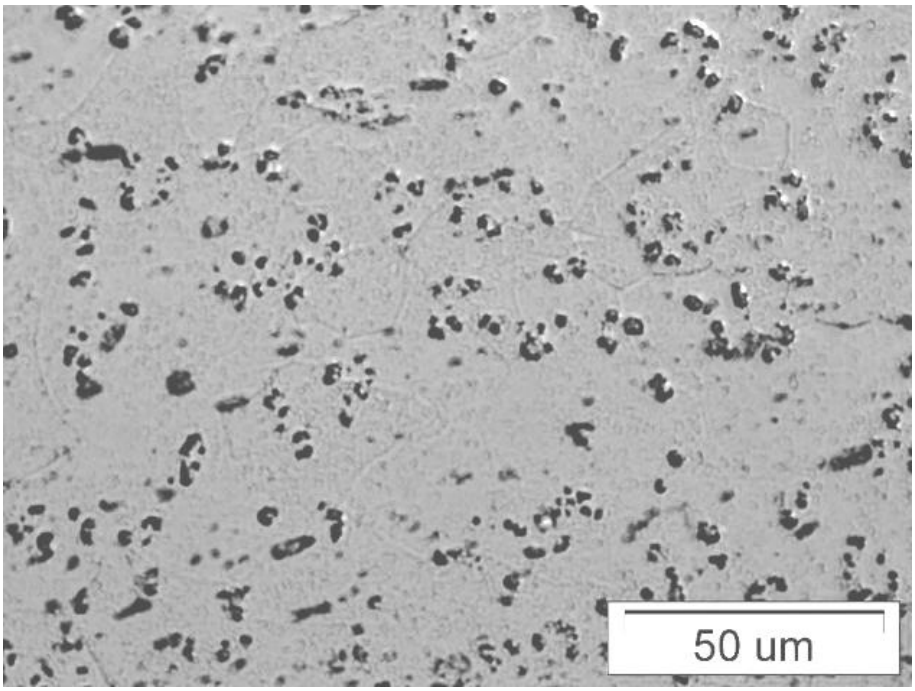
Slika 19. *Fotografija bazne površine uzorka dobivenog sljedećim režimom toplinske obrade: 450°C – ½ sata.*



Slika 20. *Fotografija poprečno prerezane površine uzorka dobivenog sljedećim režimom toplinske obrade: 450°C – ½ sata.*



Slika 21. *Fotografija bazne površine uzorka dobivenog sljedećim režimom toplinske obrade: 350ºC – 2 sata.*



Slika 22. *Fotografija poprečno prerezane površine uzorka dobivenog sljedećim režimom toplinske obrade: 350ºC – 2 sata.*

Mjerenja veličine zrna provedena su na fotografijama površine ispitnih uzoraka snimljenima pomoću mikroskopa. Mjereni su međusobno okomiti promjeri zrna te je izračunata srednja veličina promjera za svako pojedinačno zrno. Na svakoj fotografiji

izmjereno je pet kristalnih zrna, a ukupna veličina kristalnog zrna za pojedinu fotografiju izračunata je kao aritmetička sredina veličine svih izmjerenih zrna.

Provedenom toplinskom obradom dobivene su tri različite veličine kristalnog zrna: 39 μm, 47 μm, i 76 μm.

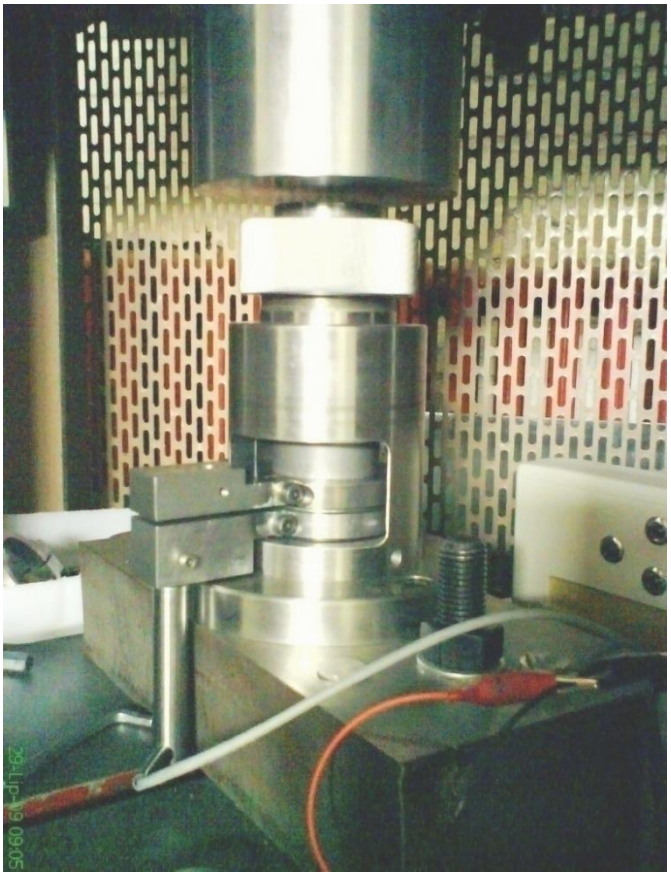
Odgovarajuće režimi toplinske obrade uz pripadajuće veličine kristalnog zrna prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Veličine kristalnog zrna postignute određenim režimom toplinske obrade.

Režim toplinske obrade	**Izmjerena veličina kristalnog zrna**
350°C – 2 sata/zrak	39 μm
450°C – ½ sata/zrak	47 μm
450°C – 2 sata/zrak	76 μm

4.1.3.3. Tijek mjerenja izlaznih veličina kod slobodnog kovanja

Kako je prethodno definirano, mjerene izlazne veličine su ukupni pomak alata, tj. ukupna deformacija materijala ispitnog uzorka i elastični povrat materijala nakon rasterećenja. Sila oblikovanja koja uvjetuje ukupni pomak alata unaprijed je definirana i ograničena podešavanjem dotoka ulja u glavni cilindar na hidrauličnoj preši. Prethodno je u odlomku 4.1. sila oblikovanja za pokus slobodnog kovanja navedena kao ulazna veličina (druga ulazna veličina je veličina kristalnog zrna). Za svaku promjenu maksimalne sile oblikovanja potrebno je novo podešavanje tlaka u glavnom cilindru. Izlazne veličine detektiraju se pomoću LVDT (linear variable differential transformer) davača pomaka. Ovaj tip električnog transformatora koristi se za mjerenja linearnih pomaka uglavnom u laboratorijskim ispitivanjima. Korišteni LVDT predviđen je za mjerenje linearnih pomaka od ±2 mm sa razlučivošću od 1 μm. Brzina radnog hoda preše iznosi 0,012 mm/s. Izlazni rezultati prate se pomoću računala u frekvenciji 10 očitanja u sekundi. Maksimalna sila oblikovanja mijenja se u koraku od 50 kN u rasponu od 50 kN na početku do 400 kN na kraju. Ispitni uzorci pojedine veličine kristalnog zrna sabijaju se određenom silom, a za svaki iznos maksimalne sile oblikovanja provodi se po 9-10 mjerenja izlaznih veličina. Fotografija alata sa mjernom opremom (LVDT) dana je na slici 23.



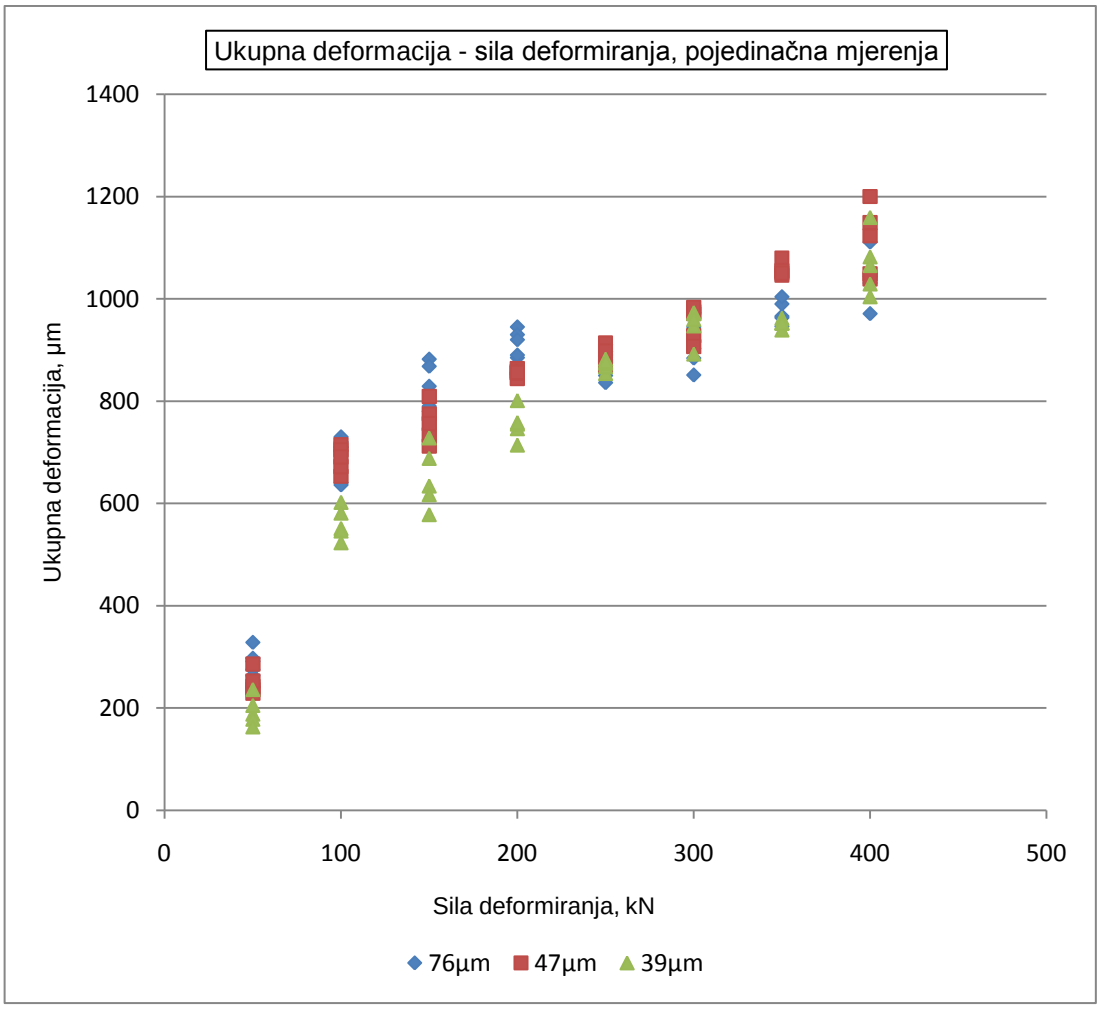
Slika 23. *Alat kojim je izvršeno eksperimentalno istraživanje*

4.1.4. Prikaz rezultata

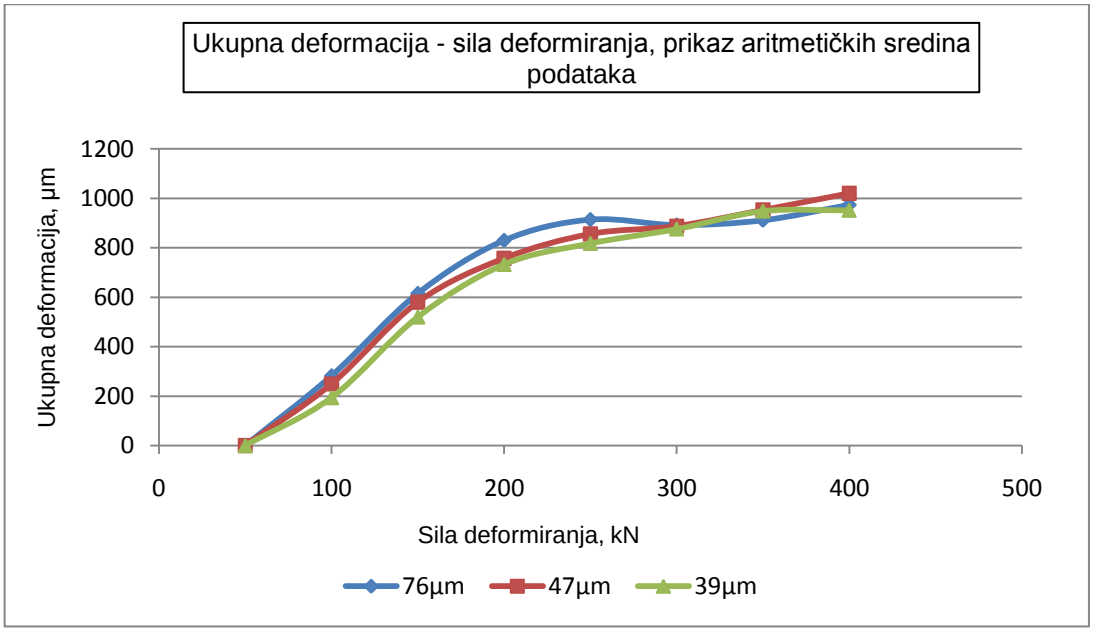
Rezultati mjerenja prikazani su u četiri dijagrama. Dva dijagrama predstavljaju pojedinačna mjerenja, a dva predstavljaju izračunatu aritmetičku sredinu pojedinačnih mjerenja. U prvom paru dijagrama dani su međuodnosi ukupne deformacije ispitnih uzoraka i sile deformiranja za svaku veličinu kristalnog zrna, dakle zavisnost prve izlazne veličine – ukupne deformacije o dvjema ulaznim veličinama – veličini kristalnog zrna i sili deformiranja (slika 24). U drugom paru dijagrama prikazana je zavisnost druge izlazne veličine – elastičnog povrata, o istim ulaznim veličinama (slika 25). Treći dijagram prikazuje međusobni odnos dviju izlaznih veličina za pojedine veličine kristalnog zrna (slika 26). Treći dijagram, zbog preglednosti, koristi samo aritmetičke sredine izlaznih veličina. Grafički prikaz rezultata mjerenja načinjen je pomoću Microsoft Office Excela. U navedenim dijagramskim prikazima iskazani su rezultati eksperimenta, ali bez posebnog osvrta na statističku obradu dobivenih podataka. Ona će biti učinjena naknadno.

(a) Odnos ukupne deformacije ispitnih uzoraka i sile deformiranja prikazan je dijagramski na slici 24 – a) i b). Potrebno je primijetiti kako u području raspona

sila od 50 kN do 250 kN veću ukupnu deformaciju (prema dobivenim mjerenjima) pokazuju ispitni uzorci krupnijeg zrna. Ova je međuzavisnost jasno vidljiva. No, u području sila oblikovanja iznad 250 kN dolazi do međusobnog križanja linija dijagrama i na prvi pogled se ne može govoriti o bitnoj razlici između mjerenja, niti o njihovoj uočljivoj međuzavisnosti. Kako bi se provjerila stvarna zavisnost ove izlazne veličine o ulaznim veličinama dobiveni podaci testirat će se naknadno pomoću programa za statističku obradu podataka.



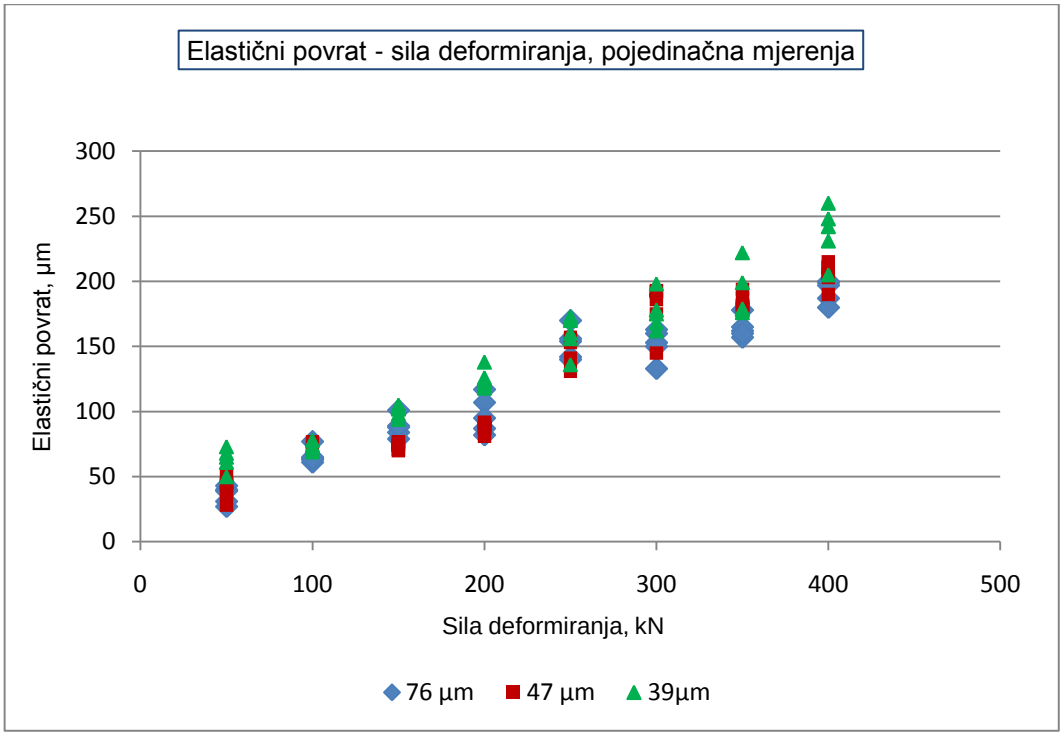
a)



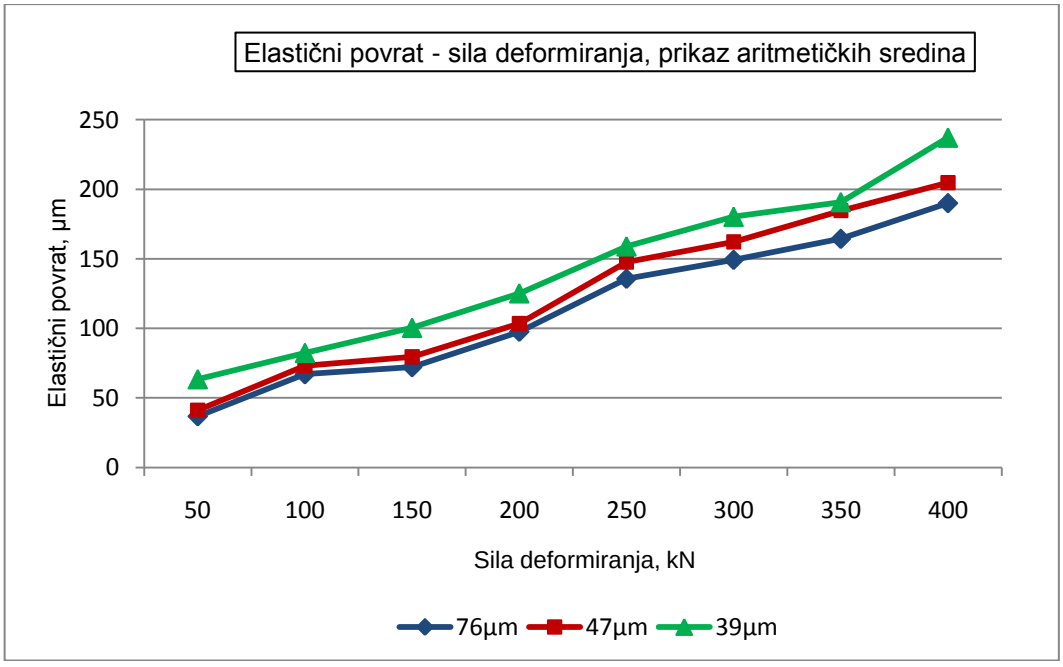
b)

Slika 24. *Utjecaj veličine zrna ispitnog uzorka i sile deformiranja na ukupnu deformaciju, a) prikaz pojedinačnih mjerenja, b) prikaz aritmetičkih sredina podataka.*

(b) Odnos elastičnog povrata i sile deformiranja prikazan je u sljedećim dijagramima, slika 25 a) i b). Ulazna veličina – sila oblikovanja kreće se u punom rasponu u kojem su mjerenja vršena. Uočljivo je da sitnozrnata struktura materijala ispitnih uzoraka ostvaruje značajno veći elastični povrat.



a)

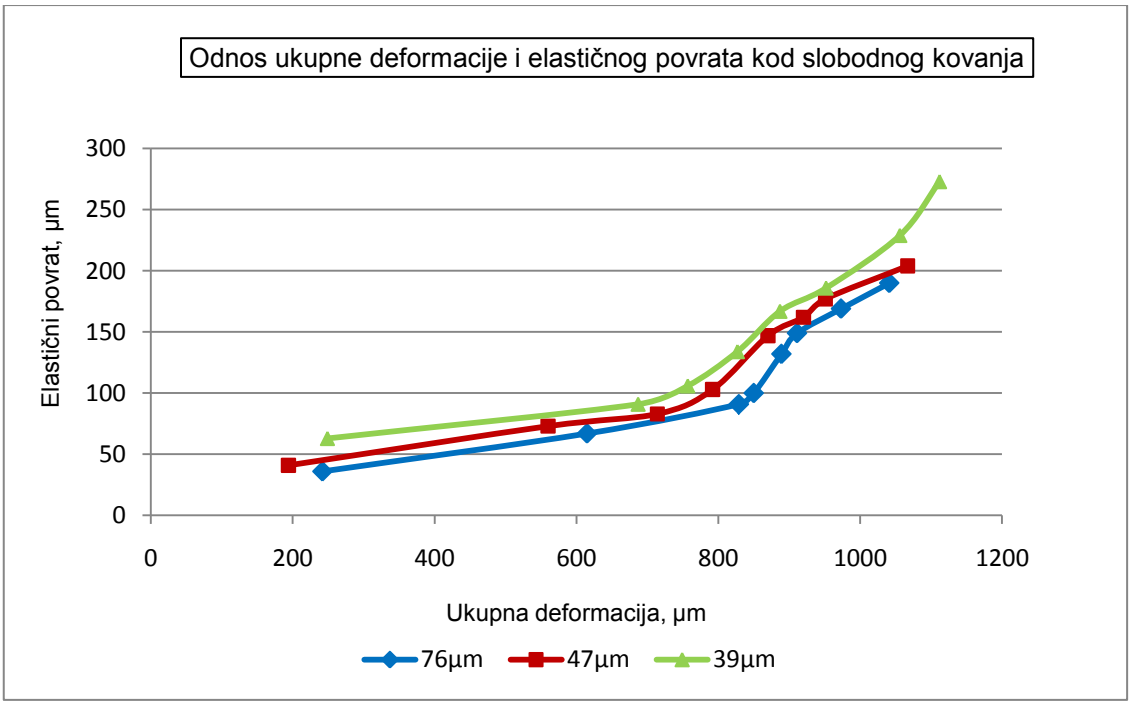


b)

Slika 25. *Utjecaj veličine zrna ispitnog uzorka i sile deformiranja na elastični povrat materijala, a) prikaz pojedinačnih mjerenja, b) prikaz aritmetičkih sredina podataka.*

(c) Odnos ukupne deformacije i elastičnog povrata daje međusobni odnos dviju izlaznih veličina u ukupnom rasponu provedenih mjerenja (sila oblikovanja 50 kN – 400 kN i sve tri promatrane veličine kristalnog zrna). Vidljivo je da veća ukupna deformacija rezultira većim elastičnim povratom. Također, manja

veličina kristalnog zrna ostvaruje veći elastični povrat od većeg kristalnog zrna. Ovaj međuodnos izlaznih veličina prikazan je radi kasnije usporedbe s rezultatima mjerenja kovanja u ukovnju (poglavlje 4.2.4).



Slika 26. *Zavisnost elastičnog povrata o ukupnoj deformaciji za pokus slobodnog kovanja.*

4.1.5. Statistička analiza rezultata

Kako je vidljivo iz prikazanih eksperimentalnih rezultata, rasipanje izmjerenih podataka jako je uočljivo. Prikazi aritmetičkih sredina ipak ukazuju na određene tendencije ponašanja veličina. Zbog ovakvog ponašanja rezultata potrebno je utvrditi signifikantnost razlika dobivenih rezultata te izvršiti njihovu statističku analizu. To je učinjeno pomoću programskog paketa za statističku obradu podataka - Design-Expert 7.1.5. Također, u cilju dobivanja funkcije zavisnosti izlaznih varijabli o ulaznima te trodimenzionalnog prikaza odzivnih površina za svaku od izlaznih varijabli, ulazne varijable prikazane su kao kontinuirane numeričke veličine određene najmanjim i najvećim iznosom. Tako je sila oblikovanja postala kontinuirana veličina najmanjeg iznosa 50 kN i najvećeg iznosa 400 kN, a veličina kristalnog zrna kontinuirana veličina najmanjeg iznosa 39 µm i najvećeg 76 µm. Proveden je dvofaktorski plan pokusa, a svi odabrani faktori i njihovi nivoi i rasponi mogu se vidjeti u *Design Summary* – izlaznoj tablici programa.

Tablica 5. Pregled članova modela

Design Summary

Study Type	Factorial	**Runs**	20
Initial Design	2 Level Factorial	**Blocks**	No Blocks
Center Points	0		
Design Model	2FI		

Factor	Name	Units	Type	Low Actual	High Actual	Low Coded	High Coded	Mean
A	Sila	kN	Numeric	50.00	400.00	-1.000	1.000	225.000
B	Velicina zrna	mikrometri	Numeric	39.00	76.00	-1.000	1.000	57.500

Std. Dev.
175.000
18.500

Response	Name	Units	Obs	Analysis	Minimum	Maximum	Mean
Y1	Ukupna deformacija	mikrometri	20	Factorial	229	1200	672.3
Y2	Elasticni povrat	mikrometri	20	Factorial	27	200	105.25

Std. Dev.	Trans	Ratio	Model
417.934		None	Main effects
62.5467		None	2FI

4.1.5.1. Analiza varijance

Da li neki faktor utječe ili ne na rezultat eksperimenta ocjenjuje se analizom varijance (ANOVA) odabranog modela. Varijanca predstavlja prosječno kvadratno odstupanje svih podataka od aritmetičke sredine i opisana je sljedećim izrazom:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \tag{22}$$

Pod rasponom podataka podataka najčešće se podrazumijeva tzv. interkvartalni raspon unutar kojeg se nalazi najmanje 50% svih izmjerenih podataka. Standardno odstupanje (devijacija) je pozitivni korijen varijance, dakle vrijedi:

$$\sigma = +\sqrt{\sigma^2} \tag{23}$$

Budući da se planom pokusa predviđaju dva faktora analizom varijance određujemo koji od navedenih faktora ima signifikantan utjecaj na varijaciju rezultata te kakav je utjecaj njihove interakcije. ANOVA (Analysis of Variance) je računski postupak pomoću kojega se ispituju podaci određenoga pokusa, kroz procjenu otklona

pojedinih srednjih vrijednosti od prosječne vrijednosti uzoraka uzetih iz nekog osnovnog skupa.

Za izračunavanje značajnosti razlike između dviju procjena parametara (u ovom slučaju radi se o aritmetičkim sredinama dobivenih podataka za pojedine veličine zrna i za dva nivoa sile oblikovanja) koristi se t (Studentov) test:

$$|t| = \frac{|\bar{x} - \mu|}{s_{\bar{x}}} \tag{24}$$

gdje je: μ – očekivanje osnovnog skupa, n – broj ponavljanja pokusa, a s^2 – nepristrana procjena varijance osnovnog skupa na osnovu varijance uzorka.

$$s^2 = \frac{n}{n-1}\sigma^2 \tag{25}$$

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{26}$$

Veličina $|t|$ mora biti manja od $|t_0|$ koji se za određenu vjerojatnost iščitava iz tablica. Ako je $|t|<|t_0|$ hipoteza H_0 se prihvaća, ako vrijedi suprotno H_0 se odbacuje.
Svakom t testu za provjeru aritmetičke sredine uzorka i skupova mora prethoditi F test. Ako je $F>F_0$ odbacuje se H_0.

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \tag{27}$$

Zaključci na osnovi pokusa u svojoj su osnovi probabilistički. Rizik prihvaćanja ili odbacivanja nekoga zaključka, a na osnovi ispitivanja nulte hipoteze, iskazuje se postotkom:

- $P>\alpha_{0,05}$(> 95,0%): (non significante)
- $P<\alpha_{0,05}$(< 95,0%): (significante),
- $P < \alpha_{0,01}$(< 99,0%): (very significante)
- $P < \alpha_{0,001}$(< 99,9%): (high level significante)

Dobivene ANOVA tablice analize utjecaja faktora na izlaznu veličinu *ukupni pomak* te na izlaznu veličinu *elastični povrat* prikazane su u tablici 6.

Tablica 6. Analiza varijance.

Response 1 Ukupna deformacija

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	3.2	2	1.643E+006	856.96	< 0.0001	significant
A-Sila	*3.269E+006*	*1*	*3.269E+006*	*1705.09*	*< 0.0001*	
B-Velicina zrna	*16936.20*	*1*	*16936.20*	*8.83*	*0.0085*	
Residual	32594.20	17	1917.31			
Lack of Fit	*793.80*	*1*	*793.80*	*0.40*	*0.5363*	***not significant***
Pure Error	***31800.40***	***16***	***1987.52***			
Cor Total	3.319E+006	19				

Response 2 Elasticni povrat

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	73334.95	3	24444.98	393.16	< 0.0001	significant
A-Sila61272.45		*1*	*61272.45*	*985.48*	*< 0.0001*	
B-Velicina zrna	*10351.25*	*1*	*10351.25*	*166.49*	*< 0.0001*	
AB	*1711.25*	*1*	*1711.25*		*27.52*	*< 0.0001*
Pure Error	994.80	6	1	62.18		
Cor Total	74329.75	19				

ANOVA tablica za izlaznu veličinu *ukupna deformacija* sugerira da odabrani utjecajni faktori nisu značajni za varijaciju izlazne veličine (podaci se ne ponašaju u skladu s F-razdiobom), dok ANOVA tablica za izlaznu veličinu *elastični povrat* ukazuje na značajni utjecaj oba utjecajna faktora na izlaznu veličinu.

Daljnjom analizom (Box Cox)[8] preporučena je logaritamska transformacija podataka u slučaju izlazne veličine *ukupna deformacija*.

Osnovna uloga transformacije podataka je prevođenje izvornih podataka u neku drugu skalu, pri čemu se može postići zadovoljavanje preduvjeta za primjenu analize varijance. Nakon obavljene transformacije podataka analiza varijance i odgovarajući testovi izvode se na osnovi transformiranih podataka.

ANOVA tablica (tablica 7) prikazuje izračunate statističke veličine nakon provedene logaritamske transformacije za ukupnu deformaciju:

Tablica 7. Analiza varijance nakon logaritamske transformacije.

Response	**1**	**Ukupna deformacija**			
Transform:	**Base 10 log**	**Constant:**	**0**		
ANOVA for selected factorial model					
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]					
	Sum of		**Mean**	**F**	**p-value**
Source	**Squares**	**df**	**Square**	**Value**	**Prob > F**
Model	1.85	3	0.62	789.69	< 0.0001
					significant
A-Sila1.	*83*	*1*	*1.83*	*2349.23*	*< 0.0001*
B-Velicina zrna	*0.013*	*1*	*0.013*	*16.58*	*0.0009*
AB	*2.546E-003*	*1*	*2.546E-003*	*3.26*	*0.0898*
Pure Error	0.012	16	7.807E-004		
Cor Total	1.86	19			

Vidljivo je da nakon provedene logaritamske transformacije podataka ANOVA tablica prikazuje značajan utjecaj oba ulazna faktora – *sile deformiranja i veličine kristalnog zrna* na izlaznu veličinu *ukupna deformacija*.

4.1.5.2. Regresijska analiza

Regresijskom analizom određene su jednadžbe koje najbolje opisuju dobivene podatke. U matematičkim modelima funkcije odziva nazivaju se još i teorijskim jednadžbama višestruke regresije. Koeficijenti regresije statistički su procijenjeni na osnovi rezultata eksperimentalnih ispitivanja. Najčešće korištena metoda za procjenjivanje parametara (koeficijenata) jest metoda najmanjih kvadrata. Ona se sastoji

[8] Ova analiza opisana je u daljnjem tekstu u sklopu Prikaza rezultata eksperimenta, odlomak 4.1.5.3.

u određivanju regresijskog pravca koji minimizira sumu tzv. rezidualnih odstupanja. Dobivene vrijednosti prikazane su u sljedećim jednadžbama:

$$\log_{10} h_{uk} = 2{,}215 + 1{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot F_{max} + 2{,}16 \cdot 10^{-3} \cdot \Phi_z - 3{,}48 \cdot 10^{-6} \cdot F_{max} \cdot \phi_z \text{ , µm} \quad (28)$$

$$\Delta h = 67{,}83 + 0{,}48 \cdot F_{max} - 0{,}59 \cdot \phi_z - 2{,}86 \cdot 10^{-3} F_{max} \cdot \phi_z \text{ , µm} \quad (29)$$

gdje je:

Δh, µm – elastični povrat, h_{uk}, µm – ukupna deformacija, ϕ_z, µm – veličina zrna, F_{max}, N – sila oblikovanja.

Svakako je potrebno napomenuti da jednadžbe dobivene regresijskom analizom eksperimentalnih podataka vrijede za specifični obrađivani slučaj.

4.1.5.3. Prikaz rezultata eksperimenta

Testiranje i prikaz rezultata eksperimenta načinjeni su kako je predloženo korištenim programom za statističku analizu - Design-Expert 7.1.5.

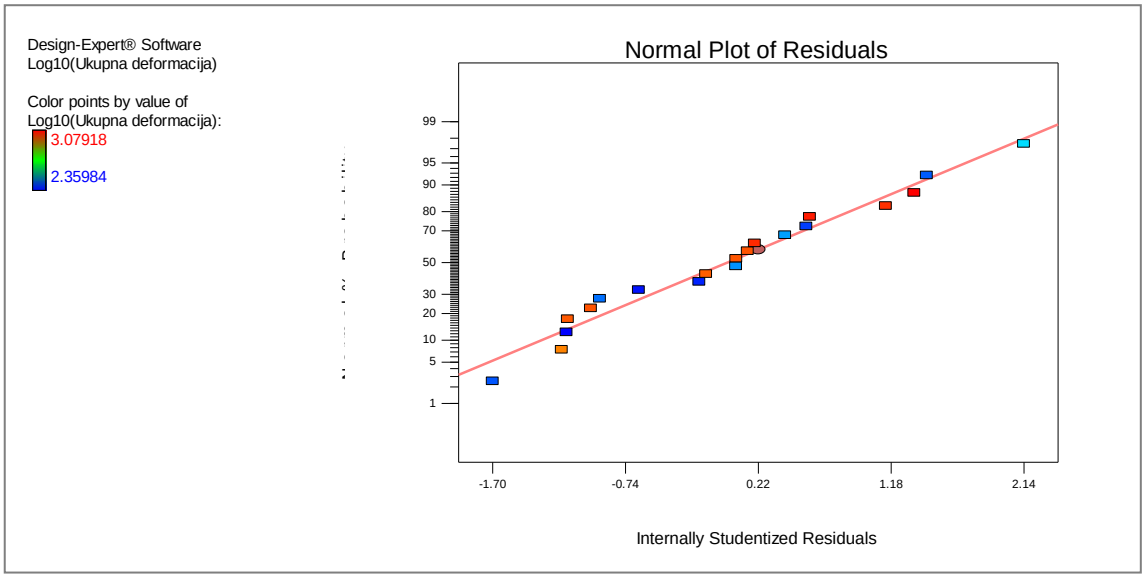
Na slikama 27-40 prikazano je ponašanje rezultata eksperimenta. Ponašanje rezultata mjerenja opisano je analizom ostataka. Ostaci faktorskog pokusa igraju vrlo važnu ulogu u određivanju adekvatnosti modela pokusa. Ostaci dvo-faktorskog pokusa opisani su kao:

$$e_{ijk} = y_{ijk} - \bar{y}_{ijk} \quad (30)$$

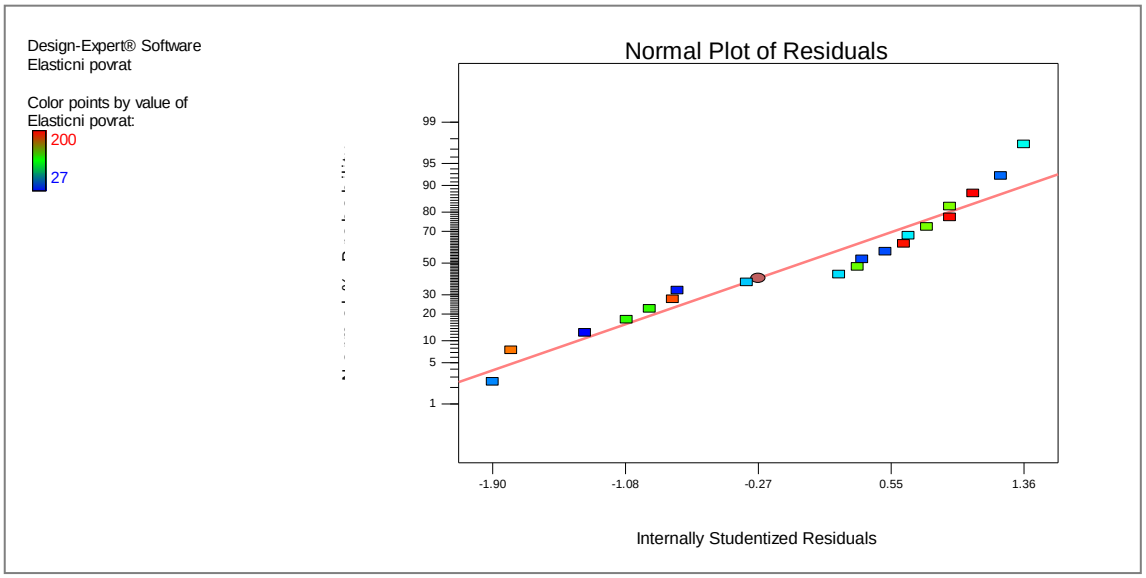
Drugim riječima, ostaci su zapravo razlika između dobivenih podataka i prosjeka ćelija. Pod ćelijom se ovdje podrazumijevaju svi iznosi izlaznih varijabli koji pripadaju određenom paru faktora.

Kod analize ostataka vrši se usporedba ostataka sa linijom normalne razdiobe. Dopuštena su mala odstupanja od linije, a točke moraju pratiti tijek linije. Međutim ako te točke čine novu jasno uočljivu krivulju onda je potrebna određena transformacija rezultata.

Dijagram ostatka prema normalnoj razdiobi (slika 27. i 28.) pokazuje da nije potrebna nikakva korekcija rezultata i da je odabrani model odgovarajući. Naravno, u slučaju ukupne deformacije kao izlazne varijable upotrijebljene su vrijednosti dobivene logaritamskom transformaciom podataka pa su zbog toga oni prikazani u drugoj skali.



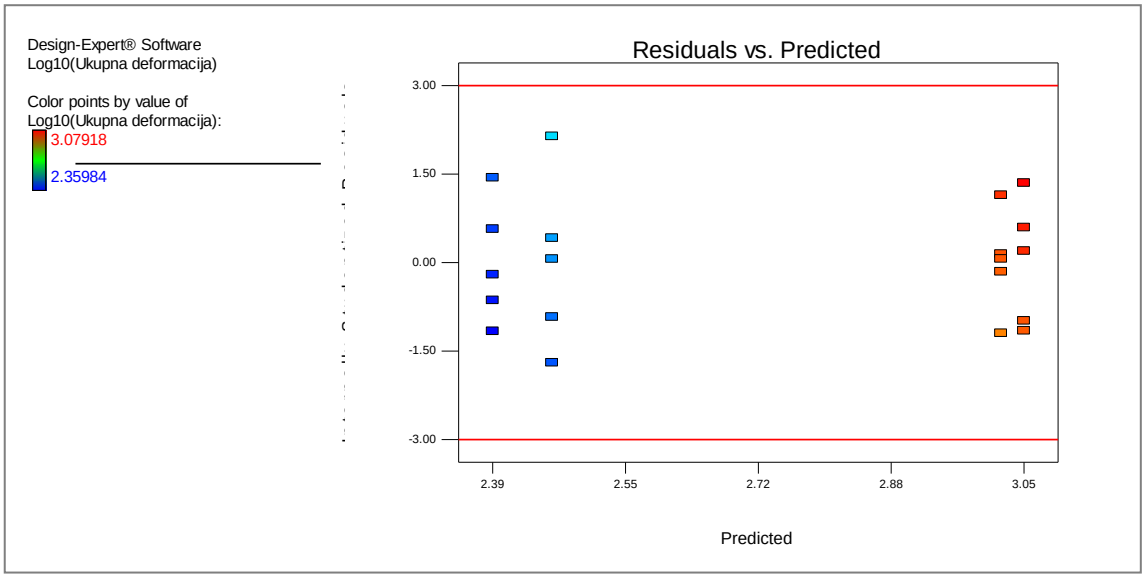
Slika 27. *Dijagram ostatka prema normalnoj razdiobi za ukupnu deformaciju.*



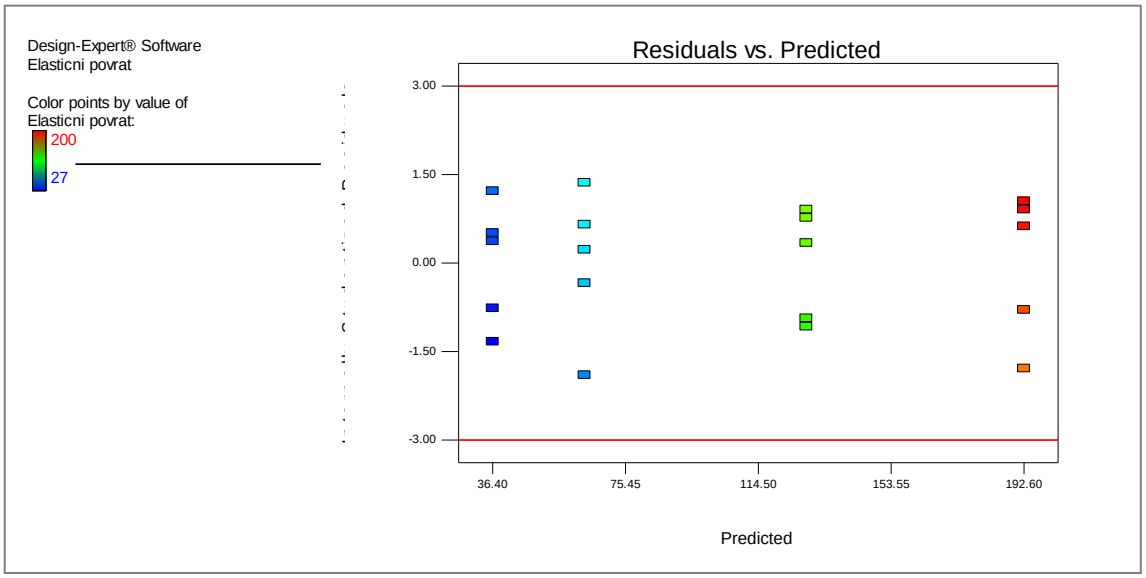
Slika 28. *Dijagram ostatka prema normalnoj razdiobi za elastični povrat.*

Daljnja provjera ostataka vrši se u odnosu na studentovu – t razdiobu. Vrijednosti ostataka moraju se nalaziti unutar izračunatog intervala[9] i biti jednoliko raspoređene po području očekivanih vrijednosti. Slike 29 i 30 prikazuje ovu analizu, a iz prikazanih dijagrama može se zaključiti kako je i prema ovoj provjeri model odgovarajući.

[9] Za $|t|=3$ razina povjerenja P iznosi 0,9973 – prema podacima u statističkim tablicama.

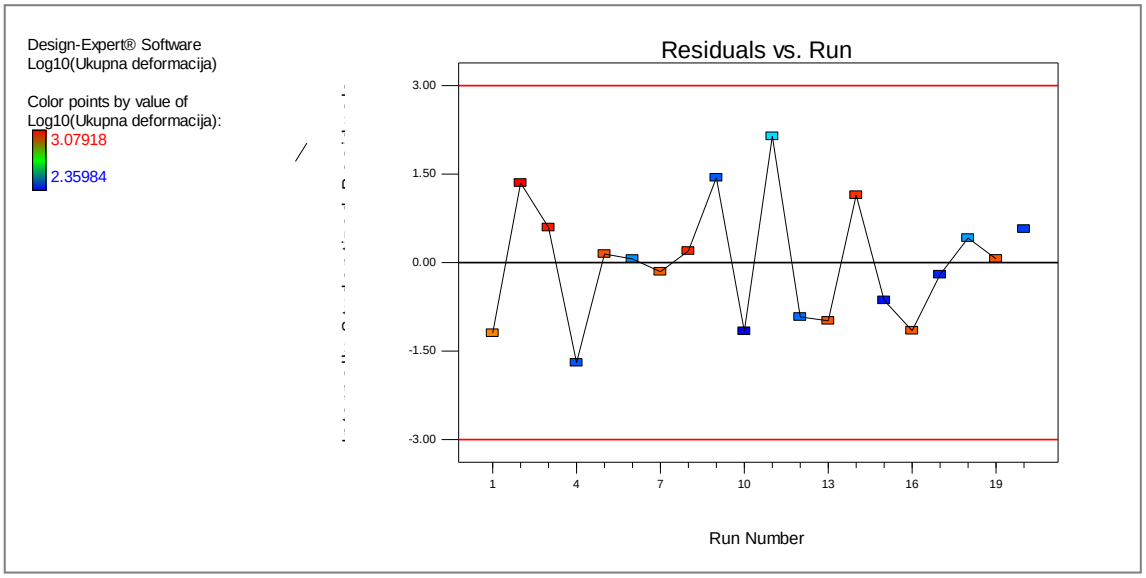


Slika 29. *Dijagram ostatka u zavisnosti o očekivanim vrijednostima za ukupnu deformaciju.*

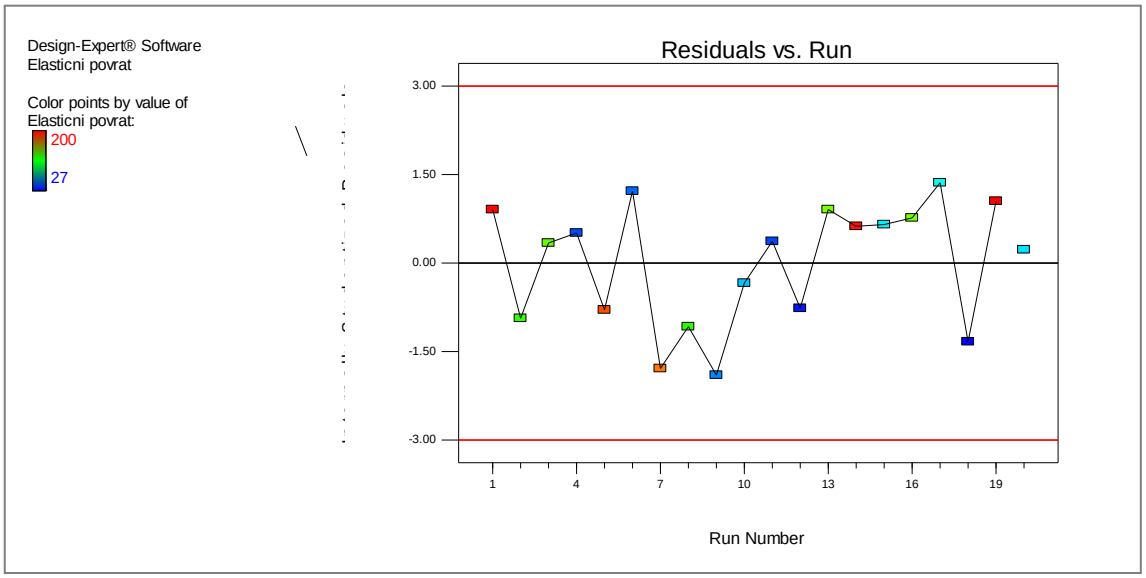


Slika 30. *Dijagram ostatka u zavisnosti o očekivanim vrijednostima za elastični povrat.*

Rezultati t testa ostataka prema rednom broju izvođenja pokusa nalaze se na slikama 31 i 32. Vrijednosti t svih točaka trebale bi se nalaziti unutar područja ±3 kao i u rezultatima t testa ostataka prema očekivanoj vrijednosti. Ako se bilo koja točka nalazi izvan tog područja, potrebno je istražiti zašto je ostatak te točke značajno veći od ostatka drugih točaka pokusa. U ovom modelu sve se točke nalaze unutar predviđenog područja.



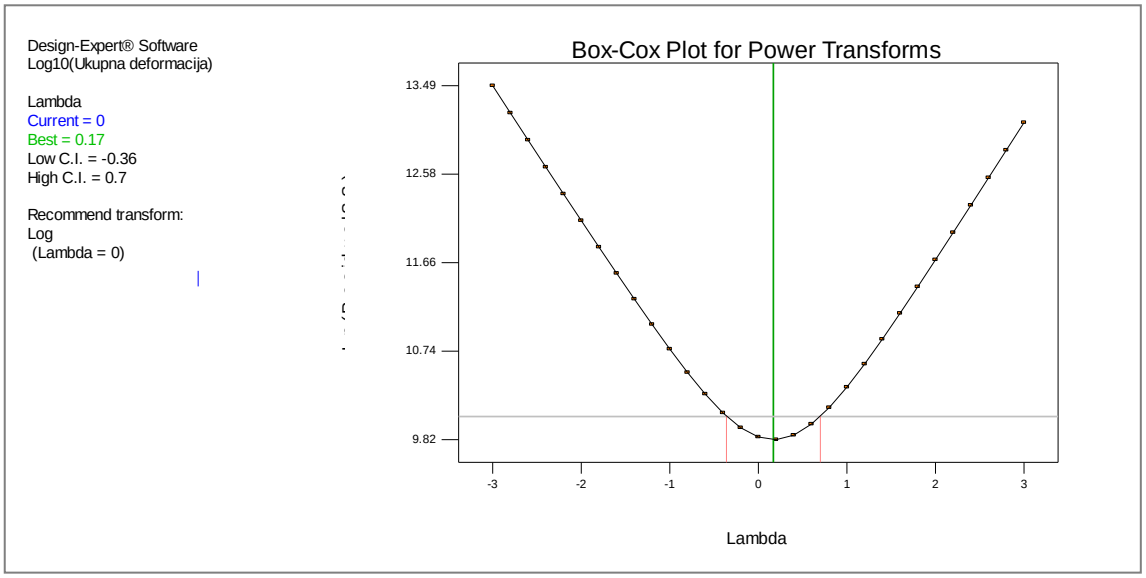
Slika 31. *Dijagram vrijednosti t prema rednom broju izvođenja pokusa –ukupna deformacija.*



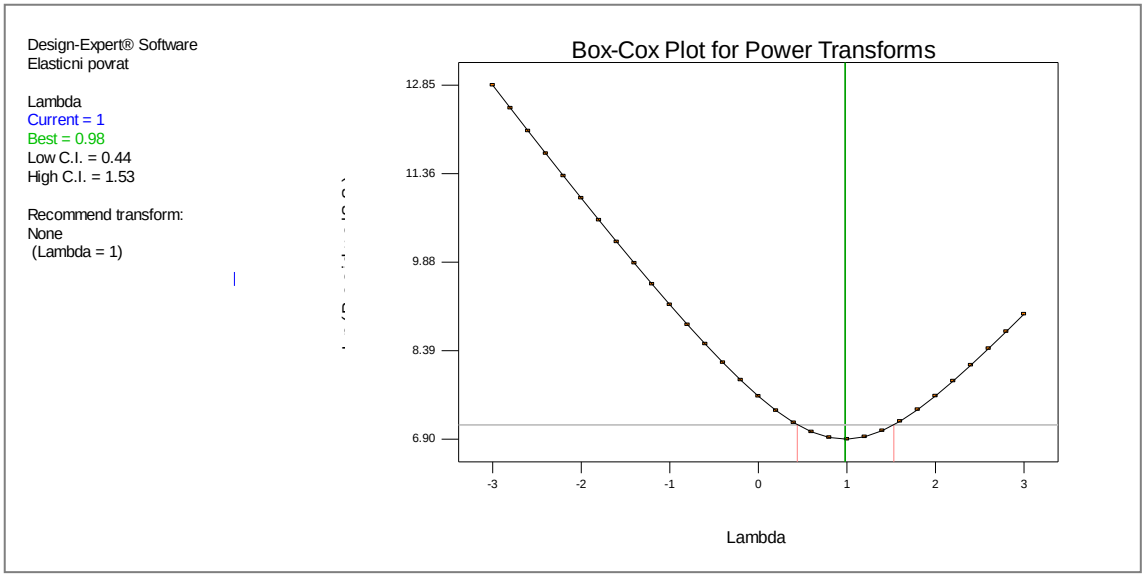
Slika 32. *Dijagram vrijednosti t prema rednom broju izvođenja pokusa – elastični povrat.*

Posljednja dijagnostička točka testiranja modela je tzv. Box Cox. Navedeni dijagram iscrtava krivulju ovisnosti prirodnog logaritma sume kvadrata ostataka o mogućoj potenciji transformacije podataka. Najpovoljniju transformaciju, odnosno potenciju transfomacije (lambda) predstavlja točka minimuma naznačena u dijagramu zelenom bojom. Na dijagramu je također prikazan i interval pouzdanosti za lambda od 95%. Ukoliko je trenutna potencija transformacije (kada nema transformacije, preporučeni lambda je 1) unutar prikazanog intervala pouzdanosti, tada nije potrebno provoditi novu transformaciju. Ovaj prikaz podataka preporučio je učinjenu

transformaciju za izlaznu veličinu *ukupna deformacija.* U nastavku je prikazan izlaz nakon provedene logaritamske transformacije pri čemu model zadovoljava uvjetima. Za izlaznu veličinu *elastični povrat* model također zadovoljava. Grafički prikazi nalaze se na slikama 33 i 34.



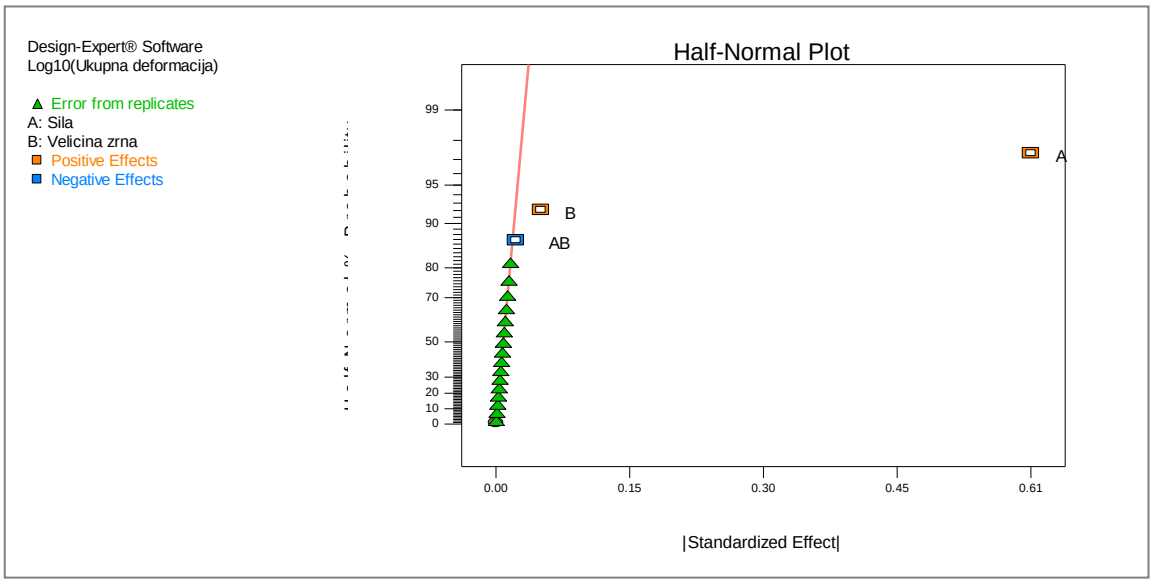
Slika 33. *Box Cox dijagram transformacija za ukupnu deformaciju.*



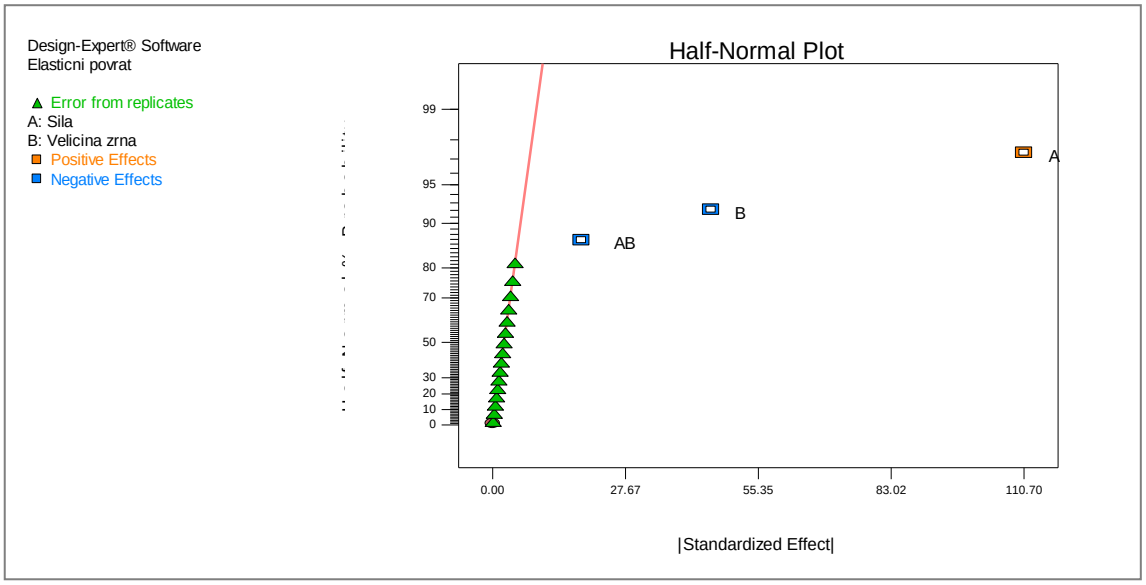
Slika 34. *Box Cox dijagram transformacija za elastični povrat.*

Budući da je glavni cilj eksperimenta utvrditi koliko pojedini faktori (ulazne veličine – kako je navedeno, radi se o sili oblikovanja i veličini kristalnog zrna) utječu na izlazne veličine (ukupnu deformaciju i elastični povrat) interesantno je promotriti grafički prikaz već izračunatih podataka iz ANOVA tablice. Dijagram koji jasno

grafički prikazuje postoji li koji signifikantan utjecaj faktora i njihovih interakcija u pokusu jest dijagram vjerojatnosti normalne razdiobe – slika 35. i 36. On prikazuje apsolutnu vrijednost utjecajnih faktora i njihovih interakcija (kvadrati ovih veličina) na apscisi te ukupnu vjerojatnost pojedinog faktora na ordinati. Za sve faktore i njihove interakcije koji ne leže na pravcu, koji prikazuje vjerojatnost normalne raspodjele podataka, i znatno odstupaju od njega može se utvrditi da imaju značajan utjecaj na rezultat ispitivanja. Što veći otklon pojedini faktor ima to je značajniji njegov utjecaj na izlaznu veličinu. Kako je vidljivo na slici 35, u slučaju ukupne deformacije (prisutna je logaritamska transformacija podataka) značajniji utjecaj ima sila oblikovanja nego veličina kristalnog zrna dok njihova interakcija ima beznačajan utjecaj na izlaznu veličinu. U slučaju elastičnog povrata (slika 36.), također, najznačajniji utjecaj zadržava sila oblikovanja no povećava se i utjecaj veličine kristalnog zrna. Interakcija oba faktora (suma kvadrata) sile oblikovanja i veličine zrna također je postala značajna za promjenu izlazne veličine elastičnog povrata.



Slika 35. *Grafički prikaz utjecaja ulaznih veličina - izlazna veličina je ukupna deformacija.*



Slika 36. *Grafički prikaz utjecaja ulaznih veličina - izlazna veličina je elastični povrat.*

U tablicama 8. i 9. prikazana su oba faktora i njihova interakcija sa pripadajućim udjelom utjecaja te njihova suma kvadrata.

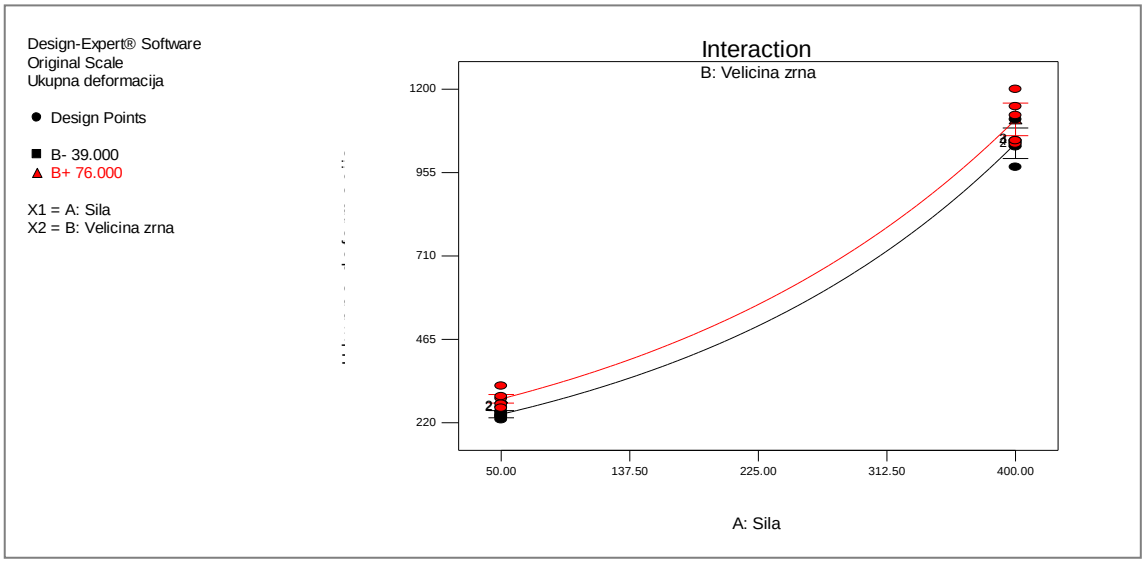
Tablica 8. Prikaz udjela utjecaja faktora i njihove interakcije za ukupnu deformaciju.

	Term	Effect	SumSqr	% Contribtn
Require	Intercept			
Model	A-Sila	0.605656	1.8341	98.4972
Model	B-Velicina zrna	0.0508851	0.0129465	0.695268
Model	AB	-0.0225643	0.00254573	0.136714
Error	Lack Of Fit		0	0
Error	Pure Error		0.0124916	0.67084
	Lenth's ME	0.0380624		
	Lenth's SME	0.0477502		

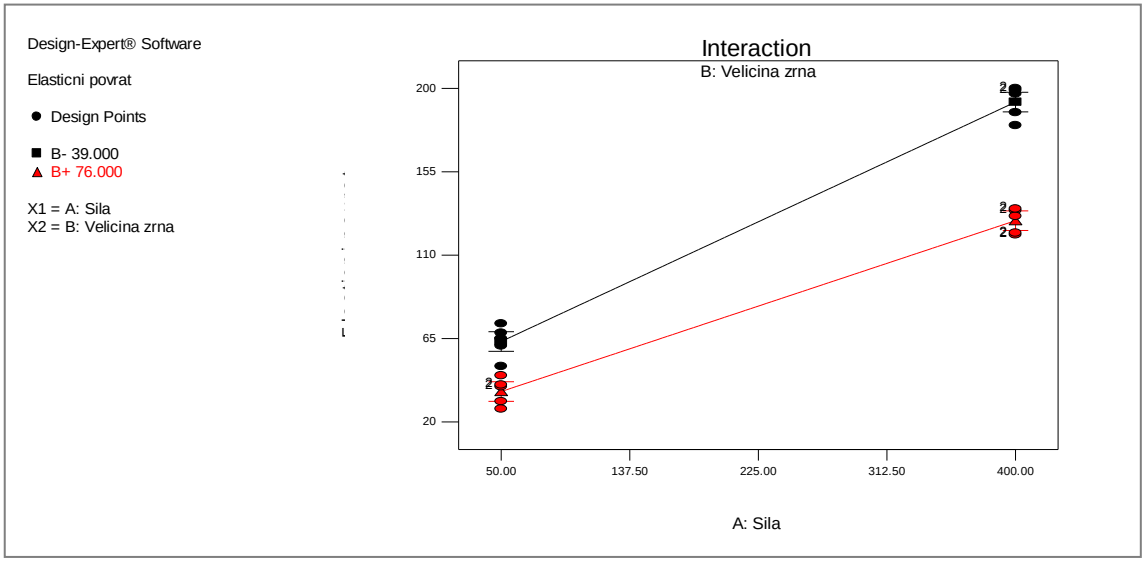
Tablica 9. Prikaz udjela utjecaja faktora i njihove interakcije za elastični povrat.

	Term	Effect	SumSqr	% Contribtn
Require	Intercept			
Model	A-Sila	110.7	61272.4	82.4333
Model	B-Velicina zrna	-45.5	10351.3	13.9261
Model	AB	-18.5	1711.25	2.30224
Error	Lack Of Fit		0	0
Error	Pure Error		994.8	1.33836
	Lenth's ME	35.662		
	Lenth's SME	44.7388		

Utjecaj faktora (A faktor je sila deformiranje, a B faktor veličina zrna) moguće je prikazati grafički promatrajući najmanju i najveću vrijednost pojedinog faktora te iznos izlazne veličine u oba slučaja. Na taj način vidljiva je tendencija ponašanja pojedine izlazne veličine s obzirom na promjenu ulaznih veličina, ali ne i signifikantnost utjecaja pojedine ulazne veličine. Ovaj prikaz dan je na slikama 37 i 38. Dok grafički prikaz za ukupnu deformaciju ukazuje na njen ravnomjeran porast pri porastu sile i porastu veličine kristalnog zrna (slika 37.), utjecaj promjene oba faktora (i sile i veličine zrna) na elastični povrat izraženiji je kod sitnijeg zrna pri porastu sile oblikovanja (slika 38.).

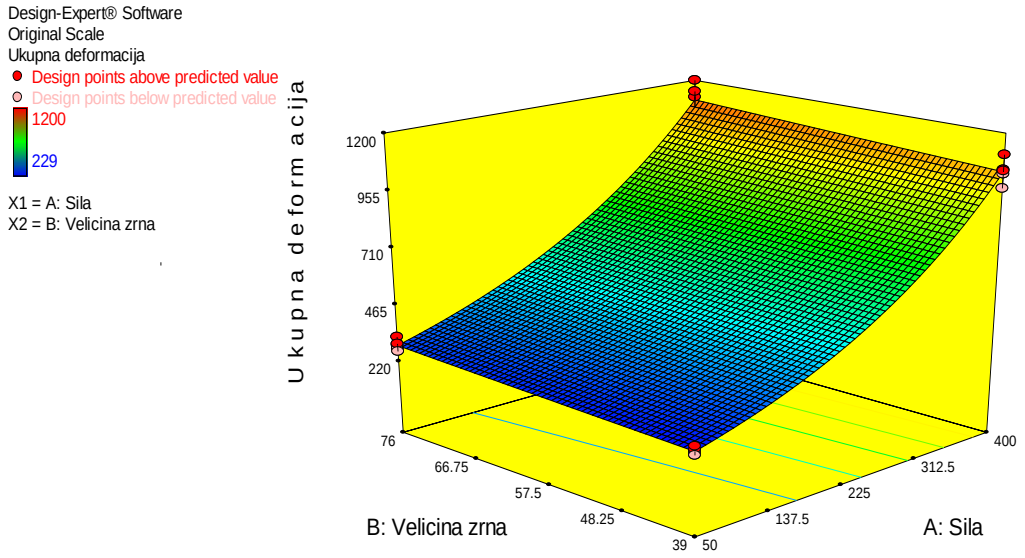


Slika 37. *Grafički prikaz utjecaja sile i veličine zrna na ukupnu deformaciju.*

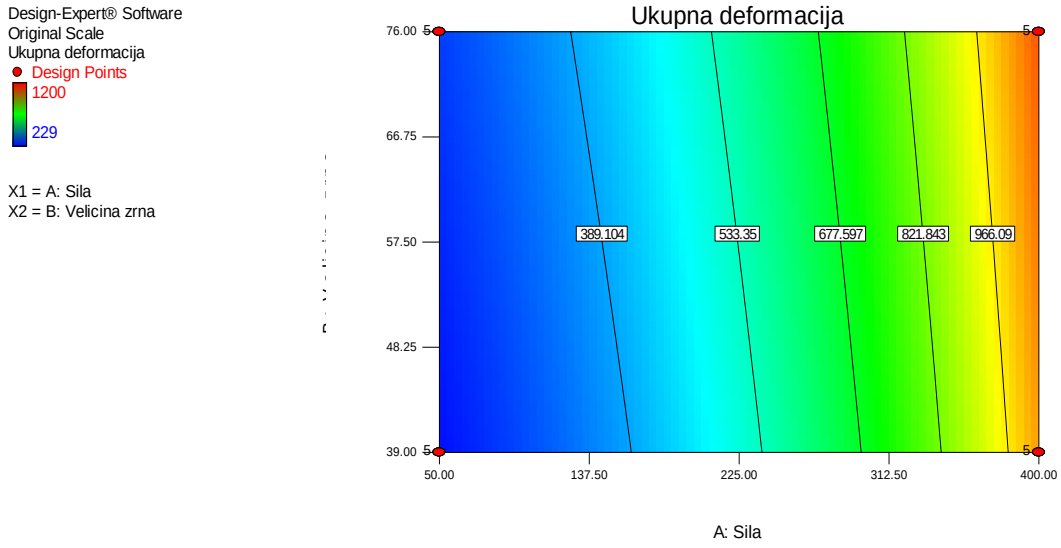


Slika 38. *Grafički prikaz utjecaja sile i veličine zrna na elastični povrat.*

Slike 39 i 40 daju trodimenzionalni prikaz utjecaja faktora A i B (sile i veličine zrna) na izlazne veličine (ukupnu deformaciju i elastični povrat). Uočljiv je različiti oblik odzivne površine kod ukupne deformacije u odnosu na elastični povrat. Ovaj oblik odzivnih površina sukladan je prethodnom grafičkom prikazu utjecaja faktora na izlazne veličine.

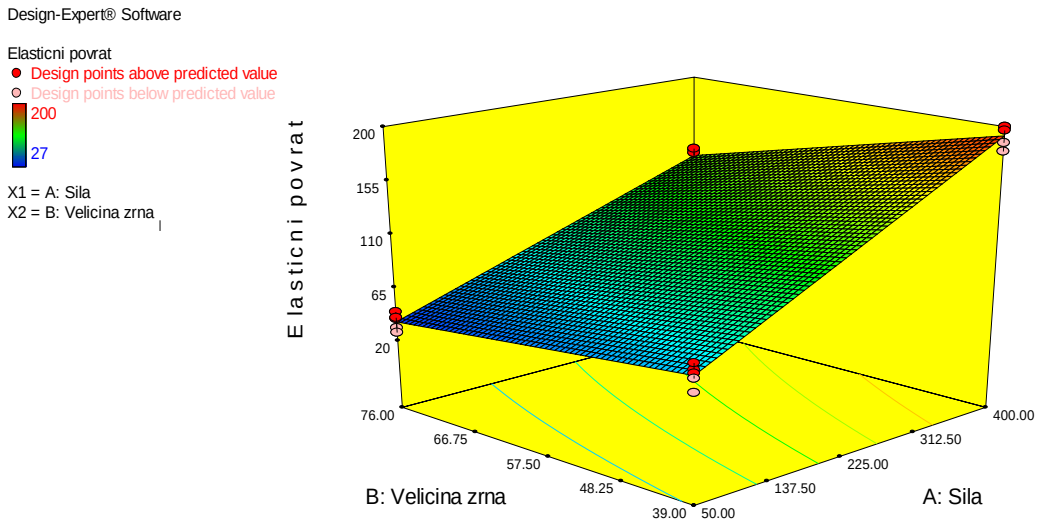


(a)

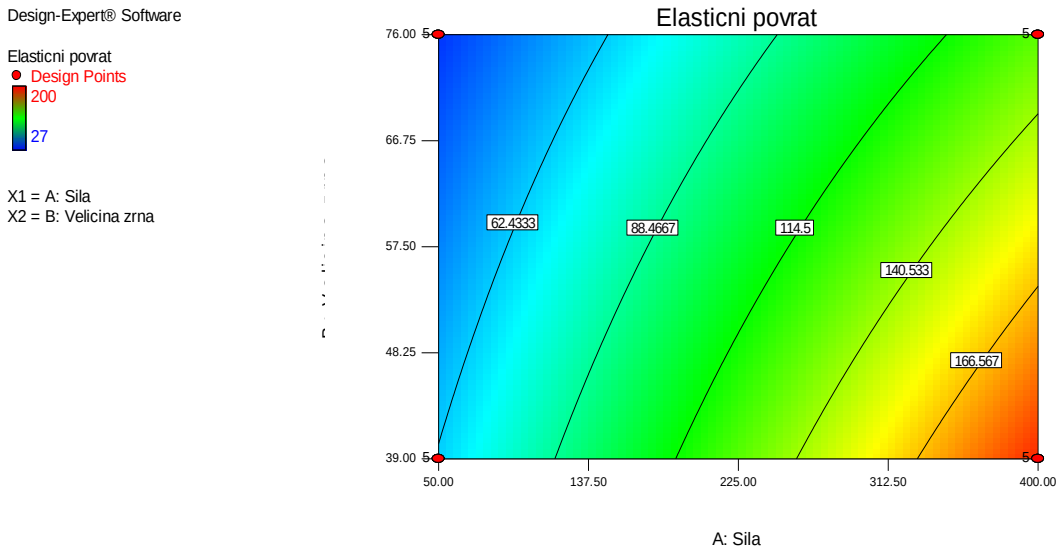


(b)

Slika 39. *(a) 3D prikaz utjecaja sile i veličine zrna na ukupnu deformaciju, (b) 2D prikaz istih utjecaja. Porastom sile i veličine zrna ukupna deformacija ravnomjerno raste.*



(a)



(b)

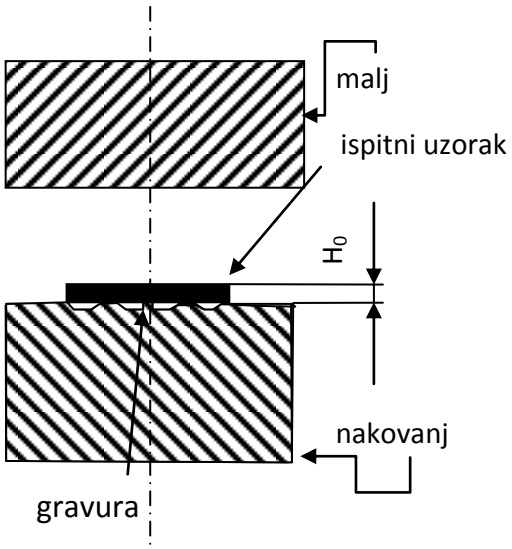
Slika 40. *(a) 3D prikaz utjecaja sile i veličine zrna na elastični povrat, (b) 2D prikaz istih utjecaja. Porast elastičnog povrata veći je kod sitnijeg zrna pri porastu sile oblikovanja.*

4.2. Planiranje pokusa kovanja u gravuri

Drugi dio eksperimentalnog istraživanja odnosi se na kovanje u otvorenoj gravuri – plitko gravurno kovanje. Kovanjem u gravuri djelomično se ograničava tečenje materijala tijekom procesa oblikovanja i promatra ponašanje izlaznih veličina u novim uvjetima.

Eksperiment se također provodi na rondelama početnog promjera 20 mm i visine 2 mm, načinjenim od aluminijskog materijala Al 99,5, i u tri različite veličine kristalnog zrna koje su jednake onima iz prvog dijela eksperimenta.

Shematski prikaz alata korištenog za pokuse plitkog gravurnog kovanja nalazi se na slici 41.



Slika 41. *Shematski prikaz korištenog alata za plitko gravurno kovanje.*

Kod slučaja kovanja u gravuri kao glavni uvjet postavlja se potpuno ispunjavanje gravure ukovnja. S tim u vezi ograničava se ukupna deformacija rondele na onu koja ispunjava navedeni uvjet. Zbog toga se u ovom dijelu eksperimenta kao ulazna veličina ne određuje maksimalna sila oblikovanja, nego ulazna veličina postaje maksimalni pomak alata (žiga) kojim se ostvaruje dovoljna konačna deformacija ispitnog uzorka.

No, bez obzira na promjenu ulazne veličine, može se govoriti o promatranju interakcije istih veličina (veličina kristalnog zrna, sila deformiranja, ukupna deformacija i elastični povrat) iako u ovom dijelu eksperimentalnog istraživanja one zamjenjuju mjesta (izlazna veličina ukupna deformacija postaje ulazna veličina te dolazi na mjesto sile deformiranja koja sada postaje izlazna veličina).

4.2.1. Cilj provođenja pokusa i odabir utjecajnih faktora

Kako bi se potvrdilo ponašanje plitkog gravurnog kovanja kao procesa mikrooblikovanja, potrebno je ustanoviti oprečno ponašanje izlaznih veličina u uvjetima ograničavanja tečenja materijala naspram onom kod kojeg materijal nesmetano teče. U prvom dijelu eksperimentalnog istraživanja potvrđen je značajan utjecaj veličine kristalnog zrna na izlazne parametre procesa, odnosno veći elastični povrat materijala sa sitnijom kristalnom strukturom. Prilikom kovanja u gravuri, kojom se tečenje materijala ograničava, očekuje se suprotna pojava – veći elastični povrat kod slučaja grublje kristalne strukture materijala. S tim u vezi očekuje se i lošije popunjavanje gravure ukovnja kod ispitnih uzoraka krupnijeg zrna[10].

U drugom dijelu eksperimentalnog istraživanja odabiru se dva utjecajna faktora. Prvi je jednak kao i u prvom dijelu – varijabilna veličina kristalnog zrna. Drugi utjecajni faktor, zbog naprijed navedenih razloga, više nije maksimalna sila oblikovanja, nego maksimalni pomak alata, odnosno maksimalna deformacija koja zadovoljava uvjet potpunog popunjavanja gravure ukovnja. Promatranjem dobivene površine gotovog komada – kovanice zaključeno je da minimalni ukupni pomak alata koji je neophodno potreban za adekvatno popunjavanje gravure ukovnja, u pojedinim optimalnim slučajevima, iznosi 800 μm, dok je 850 μm pomak koji osigurava zadovoljavajuće popunjavanje gravure u svim promatranim slučajevima.

Također, tijekom provođenja eksperimenta brzina deformacije držat će se konstantnom i iznosit će 0,012 mm/s. Zbog toga se njezin utjecaj na izlazne varijable zanemaruje. Isto tako, sva mjerenja za pojedinačnu veličinu kristalnog zrna obavljaju se u istom danu i vrše ih isti mjeritelji čime je utjecaj mjeritelja i brzine deformacije također zanemaren.

4.2.2. Odabir izlaznih varijabli i faktorskog plana pokusa

Budući da je došlo do promjene ulaznih veličina, mijenjaju se i izlazne veličine, odnosno jedna od izlaznih veličina – *ukupna deformacija*, dok izlazna veličina *elastični povrat* ostaje ista. Različiti ukupni pomaci alata, tj. različita ukupna deformacija materijala obratka, rezultirat će različitim maksimalnim silama oblikovanja koje će u ovom slučaju biti mjerene. Zato se kao prva izlazna varijabla odabire sila oblikovanja. Druga izlazna varijabla ista je kao u prvom dijelu eksperimenta i odnosi se na iznos

[10] Razlozi očekivanja ovakvog ponašanja materijala obratka navedeni su i opisani kroz karakteristike procesa mikrooblikovanja – odlomak 3.3.

elastičnog povrata materijala za dva iznosa ukupnog pomaka alata kod različitih veličina kristalnog zrna.

Sila oblikovanja bit će iskazana u kN, a elastični povrat u μm.

Obzirom da su odabrana dva utjecajna faktora i dvije izlazne veličine, i u ovom slučaju odabire se dvofaktorski plan pokusa jednak kao i u prvom dijelu eksperimenta – slobodnom kovanju.

Tablica 10. Plan pokusa eksperimentalnog ispitivanja kovanja u gravuri.

		Veličina kristalnog zrna, μm	
		Min	**Max**
		39	**76**
Ukupni pomak alata, μm		**…**	**…**
Min	**800**	**…**	**…**
Max	**850**	**…**	**…**

4.2.3. Provođenje eksperimenta

Prilikom kovanja u gravuri korišteni su jednaki ispitni uzorci kao i u prvom dijelu eksperimenta prilikom slobodnog kovanja. Toplinska obrada provedena je po istom režimu i dobivene su jednake veličine kristalnog zrna.

4.2.3.1. Tijek mjerenja izlaznih veličina kod plitkog gravurnog kovanja

Proces se odvija na istoj jednoradnoj hidrauličnoj preši kao i u prvom dijelu eksperimenta.

Kako je određeno, mjerene izlazne veličine su sila oblikovanja kod određenog pomaka alata i elastični povrat materijala nakon rasterećenja. Ukupni pomak alata praćen je na računalu preko LVDT davača pomaka te je za željeni iznos ukupnog pomaka na digitalnom manometru očitan tlak u glavnom cilindru. Tlak u cilindru nadalje je preračunat u ukupnu silu oblikovanja. Zbog male brzine deformiranja moguće je precizno kontroliranje ukupnog pomaka alata i zaustavljanje u željenom položaju.

Nakon rasterećenja, LVDT očitava elastični povrat materijala koji se i u ovom slučaju računalno bilježi.

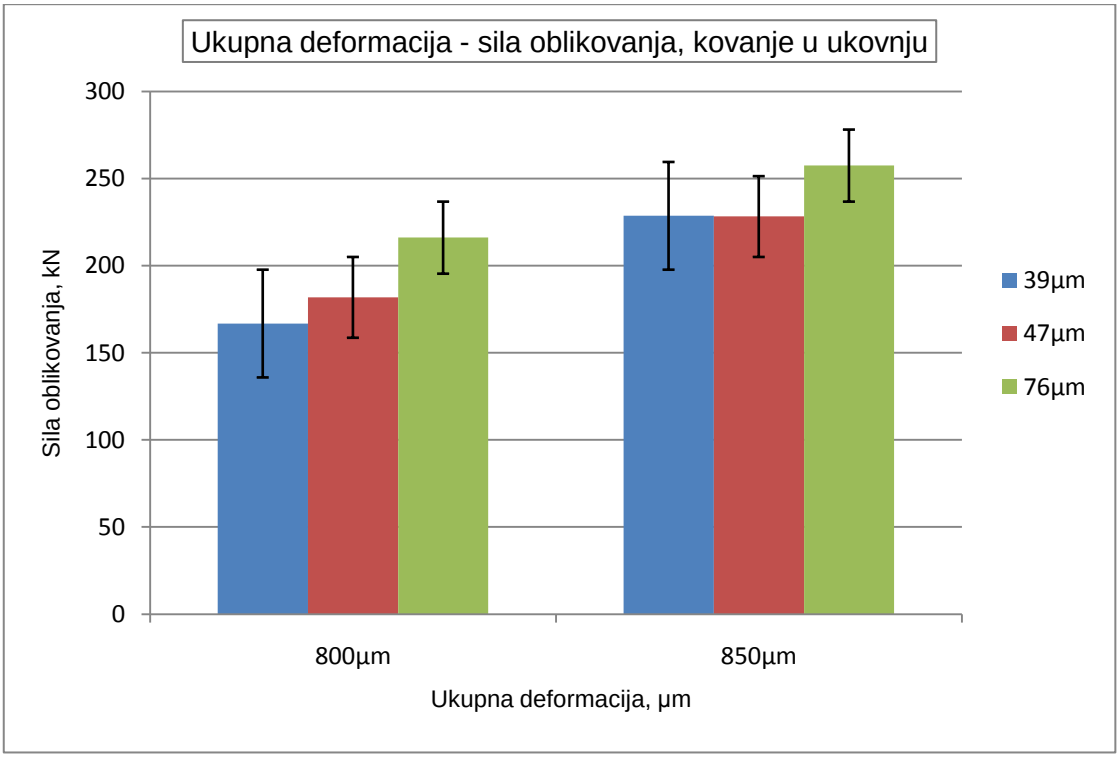
Za svaku kombinaciju pomaka alata i veličine zrna načinjeno je 9-10 mjerenja. Pojedina mjerenja (malobrojna u odnosu na broj ponavljanja) znatno su odstupala od ostalih izmjerenih vrijednosti te su eliminirana iz analize. Ovakvo rasipanje očekivani je problem opisan u odlomku 3.5. U sljedećem prikazu rezultata napravljen je slučajni izbor preostalih mjerenja i to po pet mjerenja za svaku kombinaciju ulaznih veličina.

4.2.4. Prikaz rezultata

Pomoću Microsoft Office Excela dobiven je grafički prikaz rezultata. Statistička analiza i verifikacija dobivenih rezultata bit će načinjena naknadno. U sljedećim tablicama i dijagramima dani su numerički i grafički prikazi pojedinačnih izlaznih veličina u ovisnosti o ulaznima.

(a) Odnos ukupne deformacije ispitnih uzoraka i sile deformiranja za različite veličine kristalnog zrna prikazan je dijagramski na slici 42, a u Dodatku[11] u tablici 16 dani su numerički rezultati. Sila oblikovanja je definirana kao izlazna veličina u ovom slučaju, dok su ulazne veličine ukupni pomak alata (odnosno ukupna deformacija ispitnih uzoraka) i različite veličine kristalnih zrna. Dijagram prikazuje aritmetičke sredine sile oblikovanja sa gornjim i donjom granicom rasipanja rezultata. Ukupni pomak alata (koji ujedno predstavlja i ukupnu deformaciju) ima dvije vrijednosti koje se smatraju dovoljnima za potpuno ispunjavanje gravure ukovnja - 800μm i 850μm. Veličine zrna zadržavaju se kao i kod slobodnog kovanja na tri razine - 39μm, 47μm, 76μm. Kako je vidljivo iz rezultata, veći silu oblikovanja za istu ukupnu deformaciju zahtijevaju uzorci većeg zrna. Važno je primijetiti kako je ovakav rezultat suprotan onome kod slobodnog kovanja.

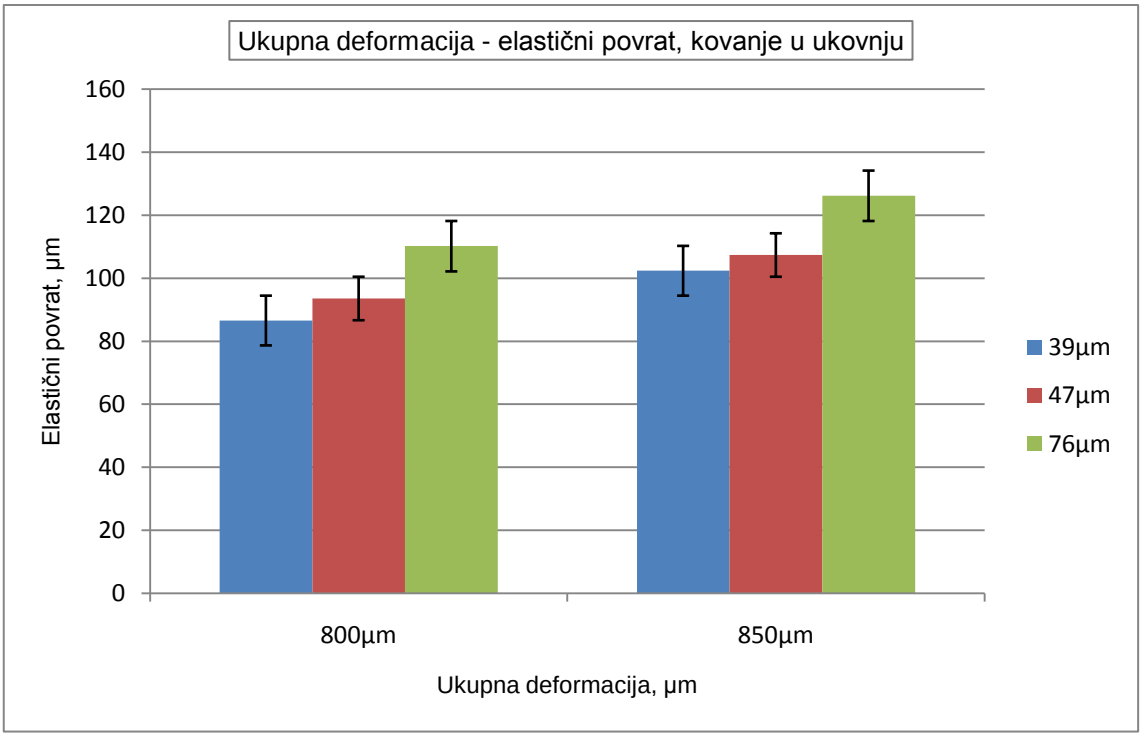
[11] Poglavlje 7. - Dodatak



Slika 42. *Utjecaj ukupne deformacije i veličine kristalnog zrna na silu oblikovanja pri plitkom gravurnom kovanju aluminija Al 99,5.*

(b) Odnos ukupne deformacije i elastičnog povrata, također za tri veličine kristalnog zrna prikazan je na slici 43, a numerički rezultati dani su u tablici 17 u Dodatku[12]. Kao i na slici 43, dijagram prikazuje aritmetičke sredine sile oblikovanja sa gornjim i donjom granicom rasipanja rezultata. U ovom slučaju ukupna deformacija također se pojavljuje u dvije veličine - 800 µm i 850 µm. Veličine kristalnih zrna i dalje su na tri iste razine. Iz rezultata je vidljivo da veći elastični povrat ostvaruje materijal ispitnog uzorka većeg kristalnog zrna. Ovakav rezultat također je (kako je i očekivano) u opreci sa rezultatom prvog dijela istraživanja – slobodnog kovanja.

[12] Poglavlje 7. - Dodatak



Slika 43. *Utjecaj ukupne deformacije i veličine kristalnog zrna na elastični povrat pri plitkom gravurnom kovanju aluminija Al 99,5.*

4.2.5. Statistička analiza rezultata

Analiza rezultata izvršena je također pomoću programskog paketa Design-Expert 7.1.5 kako bi se testirala valjanost eksperimentalno dobivenih rezultata. Također u cilju dobivanja funkcije zavisnosti izlaznih varijabli o ulaznima te trodimenzionalnog prikaza odzivnih površina za svaku od izlaznih varijabli, ulazne varijable prikazane su kao kontinuirane numeričke veličine određene najmanjim i najvećim iznosom. Ukupni pomak prikazan je kao kontinuirana veličina čiji je minimum 800 µm, a maksimum 850 µm. Veličina kristalnog zrna također je kontinuirana veličina najmanjeg iznosa 39 µm i najvećeg 76 µm. Odabran je dvofaktorski plan pokusa 2^2.

Pregled utjecajnih faktora i njihovih nivoa i raspona dan je u izlaznoj tablici programa – tablica 11.

Tablica 11. Pregled članova modela za eksperimentalno ispitivanje kovanja u gravuri.

Design Summary

Study Type Factorial **Runs** 20
Initial Design 2 Level Factorial **Blocks** No Blocks
Center Points 0
Design Model 2FI

Factor	Name	Units	Type	Low Actual	High Actual	Low Coded	High Coded	Mean	Std. Dev.
A	ukupna deformacija	mikrometri	Numeric	800.00	850.00	-1.000	1.000	825.000	25.000
B	velicina zrna	mikrometri	Numeric	39.00	76.00	-1.000	1.000	57.500	18.500

Response	Name	Units	Obs	Analysis	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev.	Ratio	Trans
Y1	sila	kN	20	Factorial	159	265	217.15	34.605	1.66667	None
Y2	elasticni povrat	mikrometri	20	Factorial	77	130	106.8	16.6594	1.68831	

Model

No model chosen

None No model chosen

4.2.5.1. Analiza varijance

ANOVA tablice analize utjecaja faktora na izlazne veličine silu i elastični povrat prikazane su u tablici 12. ANOVA tablice sugeriraju signifikantan utjecaj oba odabrana faktora (ukupne deformacije i veličine kristalnog zrna na varijacije izlaznih veličina (elastičan povrat i silu oblikovanja).

Tablica 12. Analiza varijance za rezultate eksperimentalnog ispitivanja kovanja u gravuri.

Response 1sila

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	0.000	0				
Residual	22752.55	19	1197.50			
Lack of Fit	*21415.35*	3	*7138.45*	*85.41*	*< 0.0001*	*significant*
Pure Error	*1337.20*	*16*	*83.58*			
Cor Total	22752.55	19				

Response 2 elasticni povrat

ANOVA for selected factorial model

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	0.000	0				
Residual	5273.20	19	277.54			
Lack of Fit	*4838.00*	3	*1612.67*	*59.29*	*< 0.0001*	*significant*
Pure Error	*435.20*	*16*	*27.20*			
Cor Total	5273.20	19				

4.2.5.2. Regresijska analiza

Regresijskom analizom određene su jednadžbe koje najbolje opisuju zadane podatke. Koeficijenti regresije statistički su procijenjeni na osnovi rezultata eksperimentalnih ispitivanja i karakteriziraju samo zadane eksperimentalno dobivene podatke.

Elastični povrat i sila oblikovanja prikazani su preko sljedećih jednadžbi utjecajnih faktora:

$$\Delta h = -673{,}89 + 0{,}91 \cdot h_{uk} + 6{,}3 \cdot \phi_z - 7{,}13 \cdot 10^{-3} \cdot h_{uk} \cdot \phi_z, \mu m \quad (31)$$

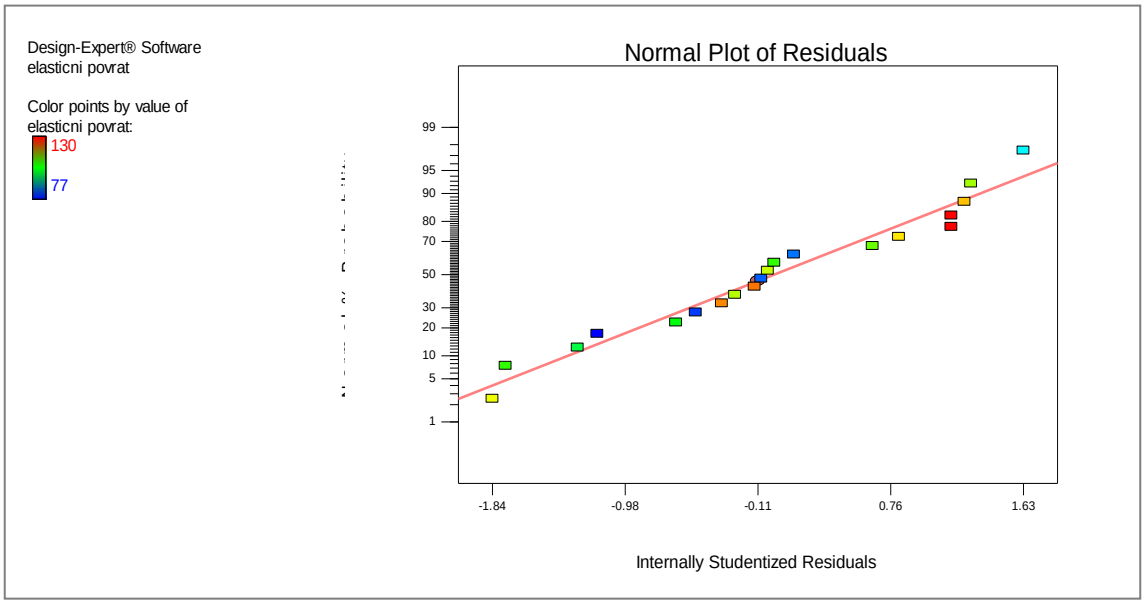
$$F_{max} = -1211{,}3 + 1{,}66 \cdot h_{uk} + 10{,}06 \cdot \phi_z - 0{,}01 \cdot h_{uk} \cdot \phi_z \, , \mu m \quad (32)$$

gdje je:

Δh, µm – elastični povrat, h_{uk}, µm – ukupna deformacija, ϕ_z, µm – veličina zrna, F_{max}, N – sila oblikovanja.

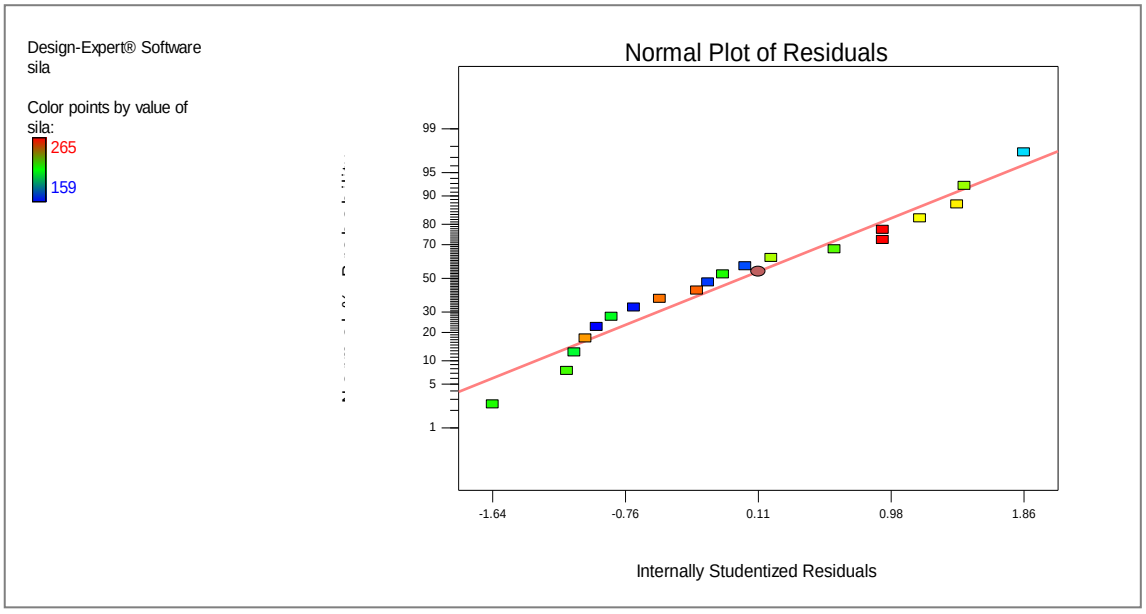
4.2.5.3. Prikaz rezultata eksperimenta

Dijagrami ostatka prema normalnoj razdiobi (slike 44 i 45) pokazuju da za obje izlazne varijable nije potrebna nikakva korekcija rezultata budući da u oba slučaja ostaci pokusa vrlo dobro sljede liniju normalne razdiobe[13].



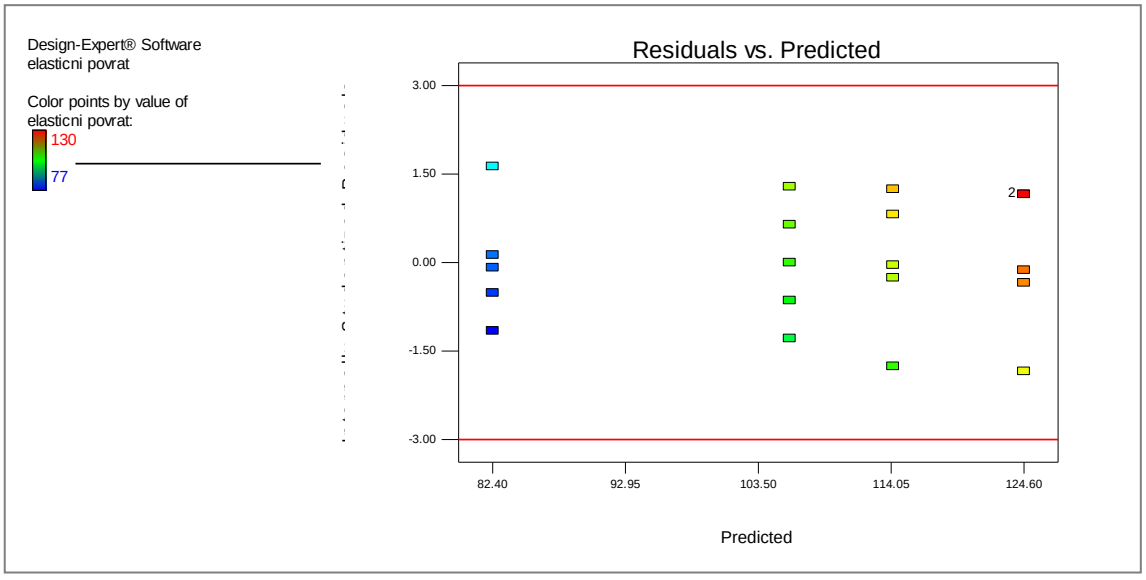
Slika 44. *Dijagram ostatka prema normalnoj razdiobi za elastični povrat kao izlaznu varijablu.*

[13] Opis načina izračunavanja zavisnosti ostataka prema normalnoj razdiobi nalazi se u odlomku 4.1.5.3.

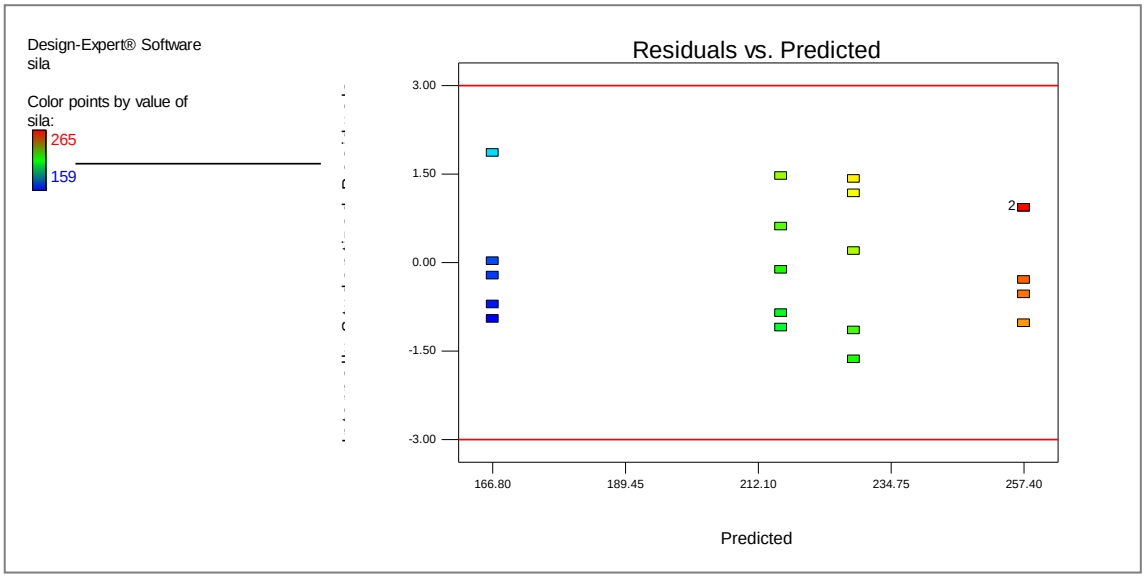


Slika 45. *Dijagram ostatka prema normalnoj razdiobi za silu kao izlaznu varijablu.*

Provjera ostatka u odnosu na studentovu – t razdiobu prikazana je na slikama 46 i 47. Vrijednosti ostataka nalaze se unutar izračunatog intervala $t = \pm 3$. Također su vrijednosti ostataka jednoliko raspoređene po području predviđenih vrijednosti. To vrijedi za obje izlazne varijable te je i prema ovoj provjeri model odgovarajući.

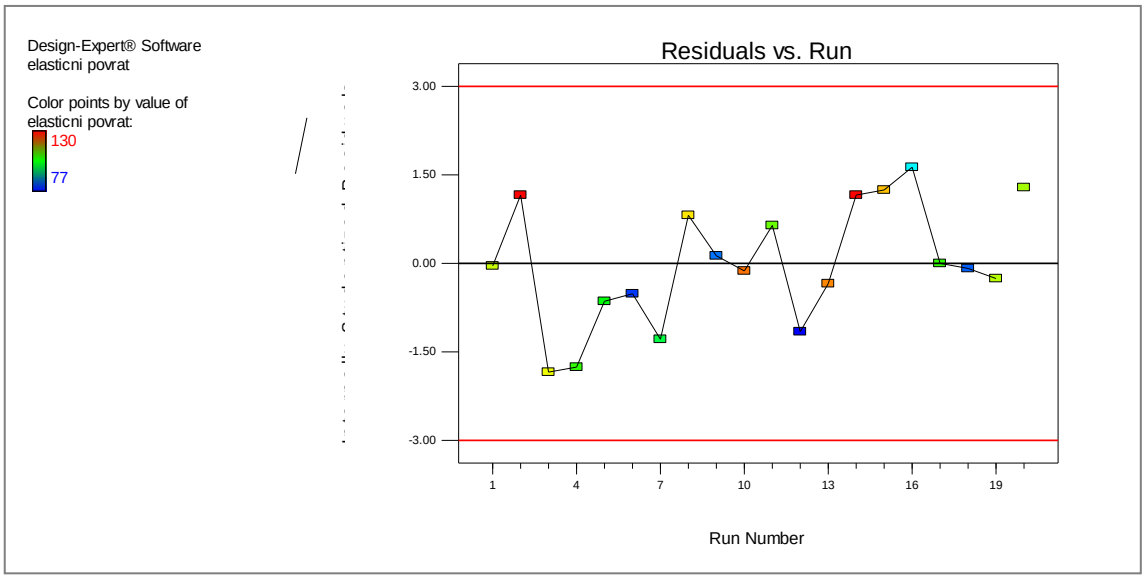


Slika 46. *Dijagram ostatka u zavisnosti o očekivanim vrijednostima za elastični povrat.*

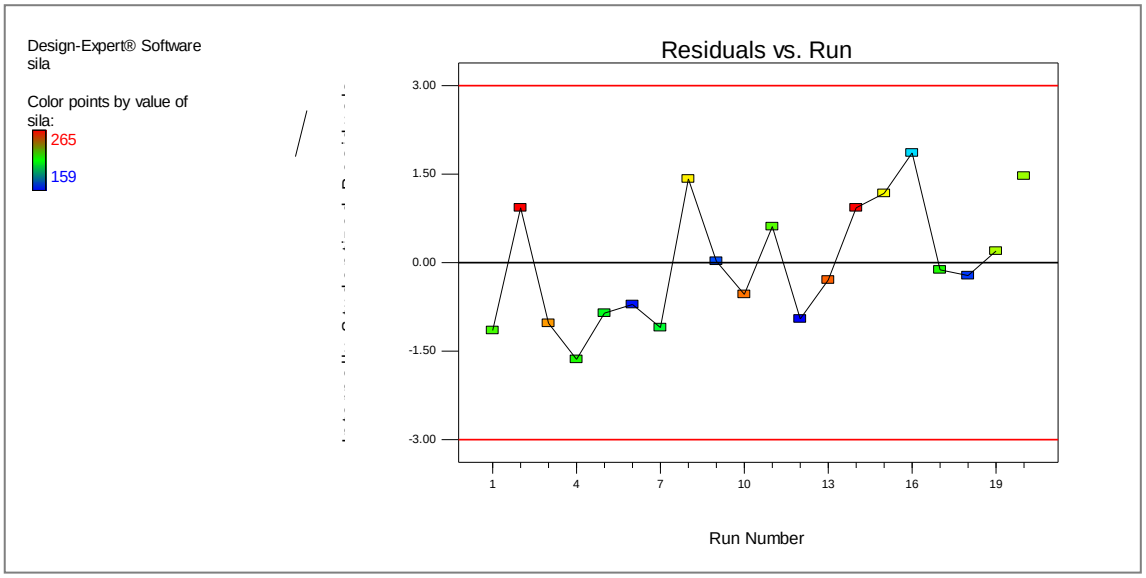


Slika 47. *Dijagram ostatka u zavisnosti o očekivanim vrijednostima za silu oblikovanja.*

Prema rednom broju izvođenja pokusa t vrijednosti svih točaka moraju se također nalaziti unutar intervala ±3. Na slikama 48 i 49 vidljivo je da se ove točke i nalaze unutar zadanog područja za obje izlazne varijable.

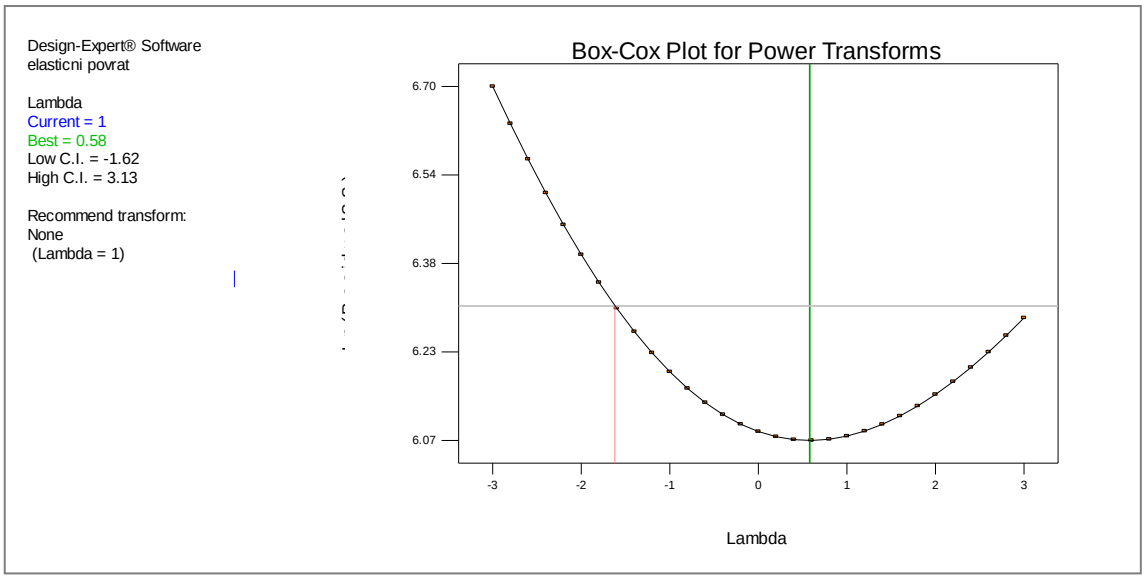


Slika 48. *Dijagram T vrijednosti prema rednom broju izvođenja pokusa za elastični povrat.*

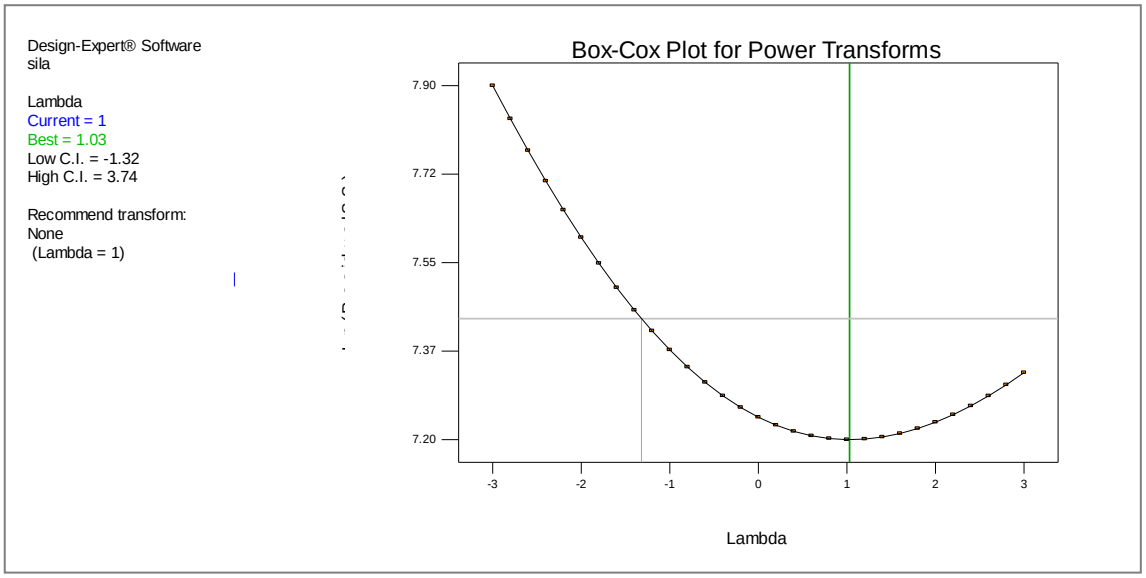


Slika 49. *Dijagram T vrijednosti prema rednom broju izvođenja pokusa za silu oblikovanja.*

Posljednja točka testiranja modela – Box Cox pokazuje da se trenutna potencija transformacije (lambda je 1 što znači da transformacija izostaje) unutar prikazanog intervala pouzdanosti, dakle nove transformacije modela su nepotrebne.

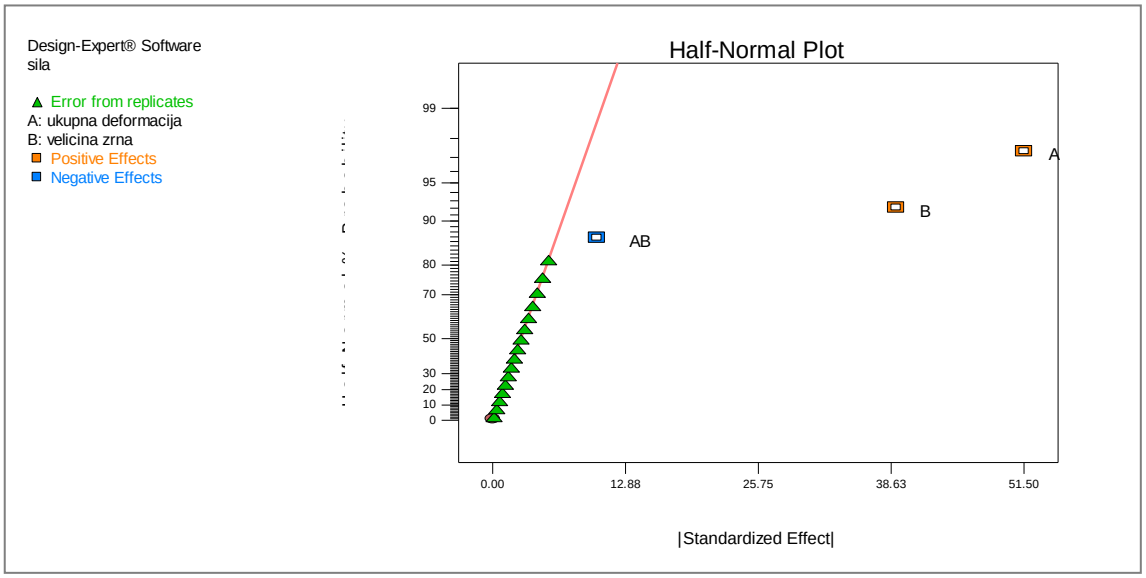


Slika 50. *Box Cox dijagram transformacija za elastični povrat.*

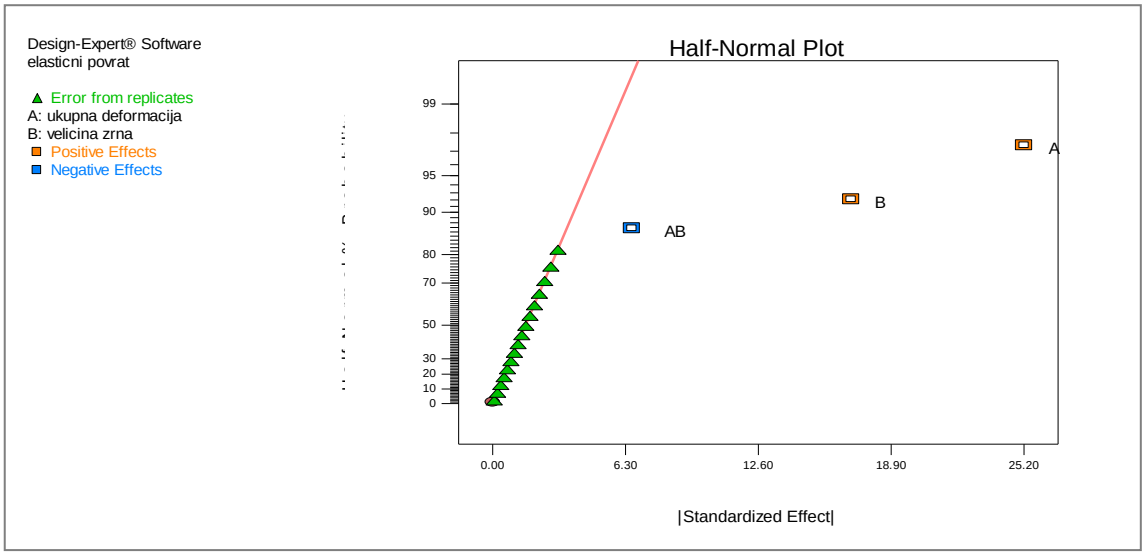


Slika 51. *Box Cox dijagram transformacija za silu oblikovanja.*

Utjecaj odabranih faktora na izlazne varijable prikazan je na slikama 52 i 53. Već je rečeno u odlomku 4.1.5.3. kako faktori udaljeniji od pravca imaju značajniji utjecaj na izlaznu varijablu od onih bližih. Primjetno je da za obje izlazne varijable oba faktora imaju značajan utjecaj, ali i njihova međusobna interakcija. Ovi podaci, kako je i očekivano, odgovaraju onima iz ANOVA tablice koji to numerički prikazuju.



Slika 52. *Prikaz vjerojatnosti normalne razdiobe – izlazna veličina je sila.*



Slika 53. *Prikaz vjerojatnosti normalne razdiobe – izlazna veličina je elastični povrat.*

Tablice 15 i 16 prikazuju postotak utjecaja pojedinačnih faktora – ukupne deformacije i sile oblikovanja i njihove interakcije na obje izlazne veličine.

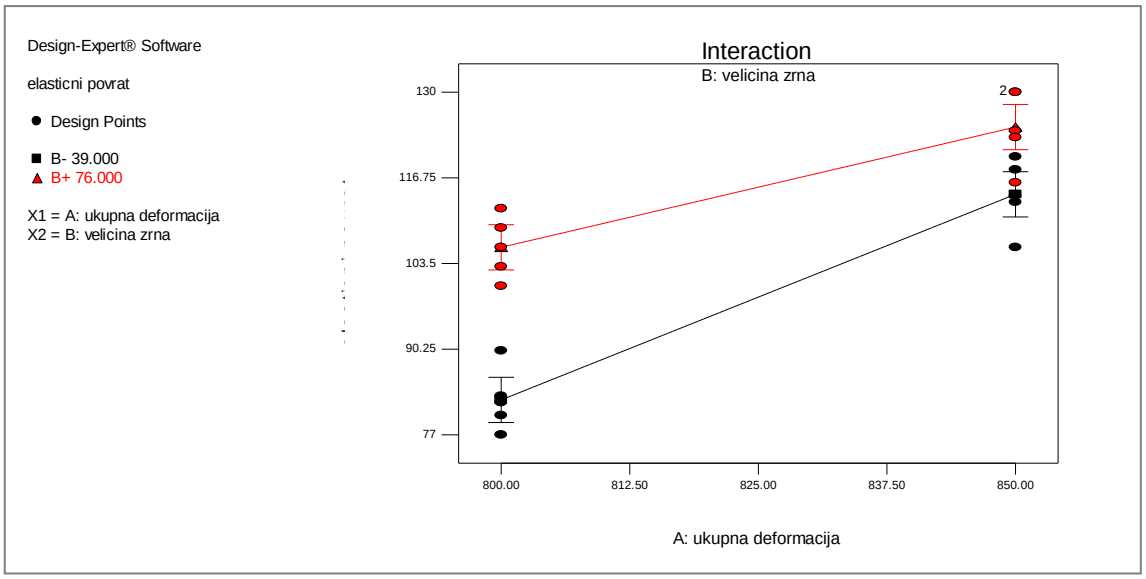
Tablica 13. Udio utjecaja za silu kao izlaznu veličinu.

	Term	Effect	SumSqr	% Contribtn
Require	Intercept			
Model	A-ukupna deformacija	51.5	13261.3	58.2847
Model	B-velicina zrna	39.1	7644.05	33.5965
Model	AB	-10.1	510.05	2.24173
Error	Lack Of Fit		0	0
Error	Pure Error		1337.2	5.87714
	Lenth's ME	31.1564		
	Lenth's SME	39.0864		

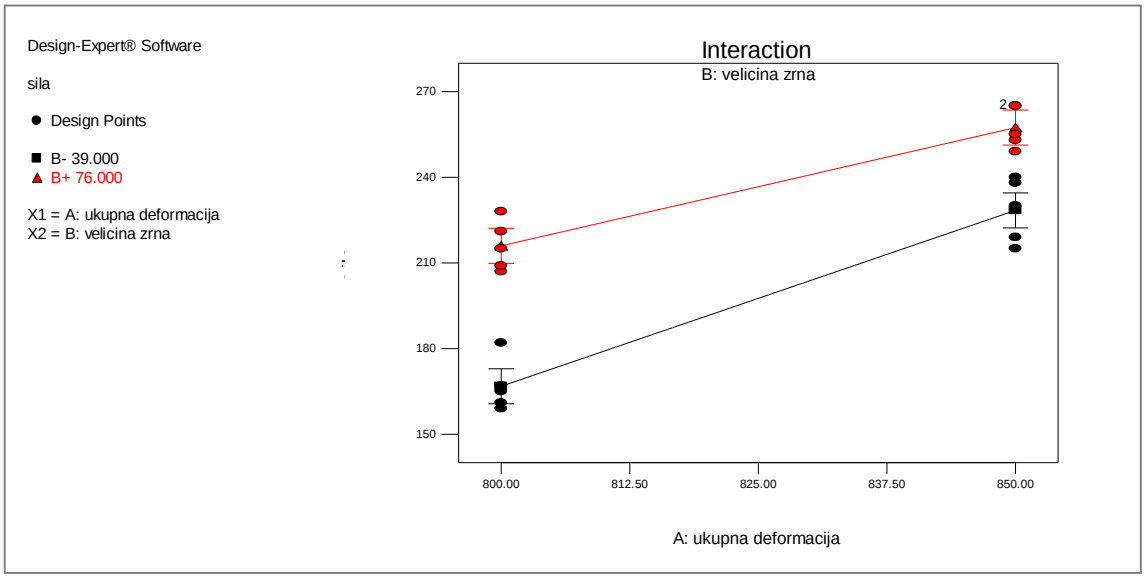
Tablica 14. Udio utjecaja za elastični povrat kao izlaznu veličinu.

	Term	Effect	SumSqr	% Contribtn
Require	Intercept			
Model	A-ukupna deformacija	25.2	3175.2	60.2139
Model	B-velicina zrna	17	1445	27.4027
Model	AB	-6.6	217.8	4.13032
Error	Lack Of Fit		0	0
Error	Pure Error		435.2	8.25305
	Lenth's ME	13.8944		
	Lenth's SME	17.4308		

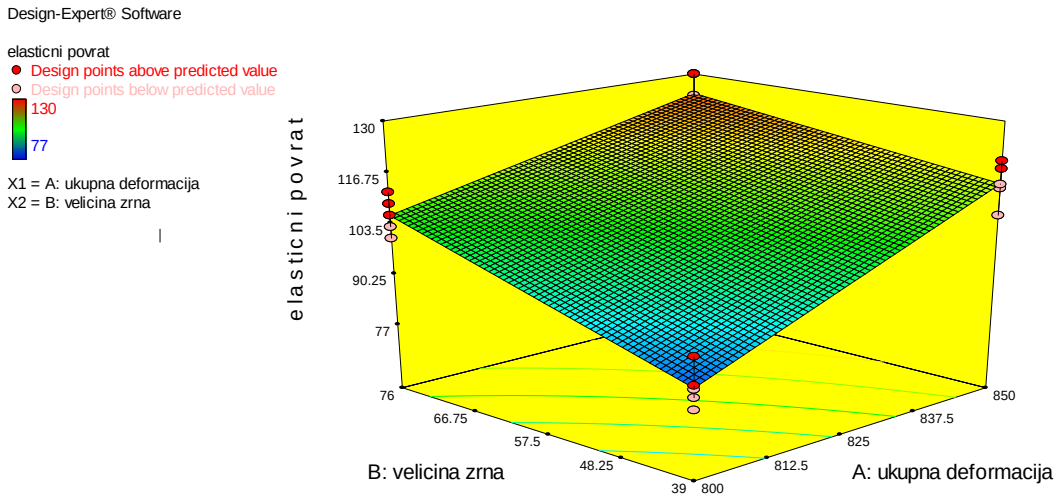
Grafički prikaz utjecajnosti ulaznih faktora na promjenu pojedine izlazne veličine (slike 54 i 55) pokazuje da je utjecajnost kod obje izlazne varijable, i elastičnog povrata i sile oblikovanja, izraženija u slučaju većeg zrna, ali kod manje ukupne deformacije.



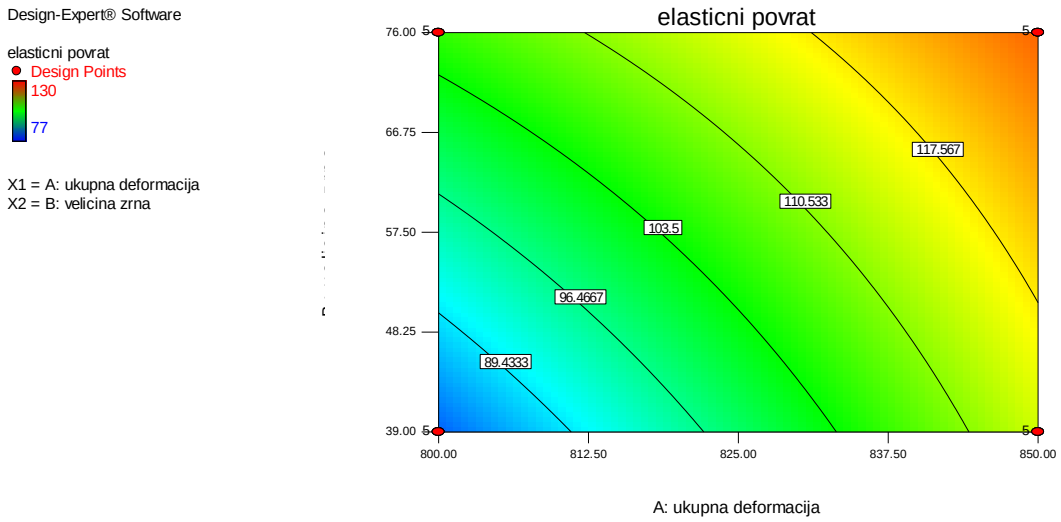
Slika 54. *Grafički prikaz utjecaja ulaznih faktora na silu.*



Slika 55. *Grafički prikaz utjecaja ulaznih faktora na elastični povrat.*

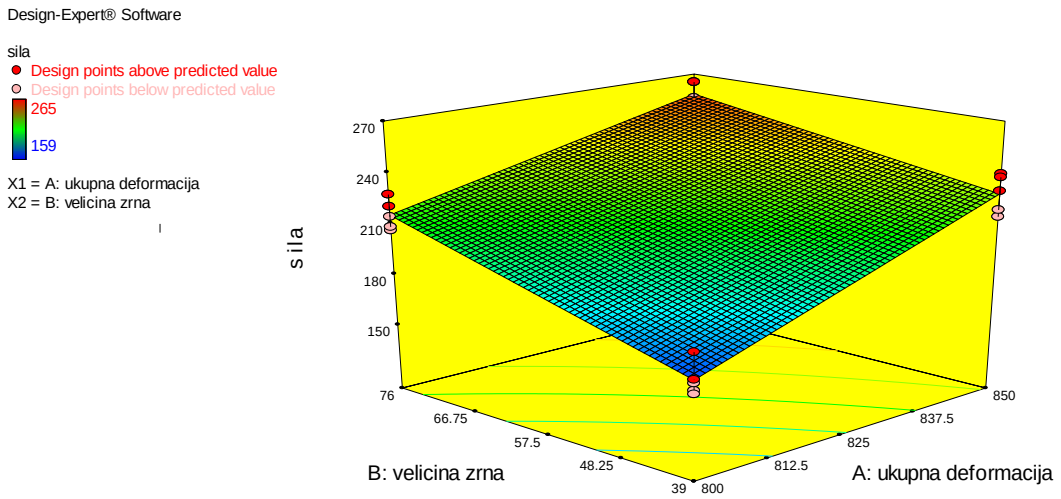


(a)

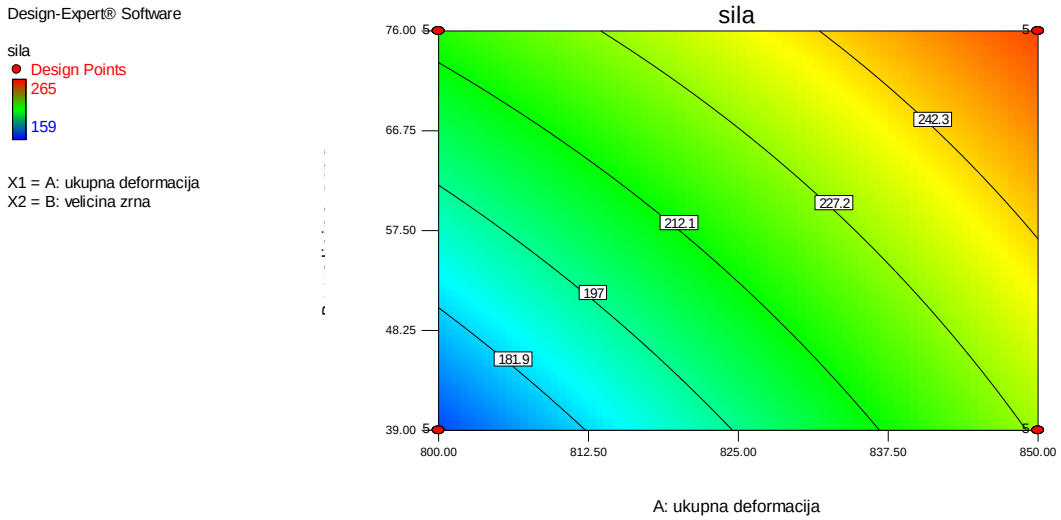


(b)

Slika 56. *Prikaz utjecaja ukupne deformacije i veličine kristalnog zrna na elastični povrat pri plitkom gravurnom kovanju aluminija Al 99,5: (a) 3D prikaz (b) 2D prikaz.*



(a)



(b)

Slika 57. *Prikaz utjecaja ukupne deformacije i veličine kristalnog zrna na silu oblikovanja pri plitkom gravurnom kovanju aluminija Al 99,5: (a) 3D prikaz (b) 2D prikaz.*

4.2.6. Snimanje površine ispitnih uzoraka stereomikroskopom

U cilju utvrđivanja utjecaja veličine kristalnog zrna na popunjenost gravure i s tim u vezi na kvalitetu dobivenog otiska na ispitnim uzorcima, najsitniji detalji površinske geometrije promatrani su stereomikroskopom. Uzorci su odabrani nasumično i to po dva uzorka od svake veličine kristalnog zrna pri čemu je jedan od njih pretrpio ukupnu deformaciju 800 µm, a drugi 850 µm, odnosno, direktno u vezi s tim, u slučaju manje ukupne deformacije bila je potrebna i manja sila oblikovanja, a u slučaju veće ukupne deformacije i veća sila oblikovanja.

Najuočljivija razlika u jasnoći otiska vidljiva je na uzorcima veličine zrna 76 μm i 39 μm kod ukupne deformacije 800 μm. U slučaju sitnijeg zrna već sa ovom manjom ukupnom deformacijom postiže se potpuno jasan otisak na površini. Uzorci čija je struktura krupnijeg kristalnog zrna zahtijevaju veću ukupnu deformaciju kako bi se postigla ista jasnoća otiska.

Potrebno je naglasiti kako je pri ukupnoj deformaciji od 800 μm značajno različita sila oblikovanja za navedene veličine zrna. U slučaju veličine zrna 39 μm prosječna sila oblikovanja iznosi približno 175 kN, a u slučaju zrna veličine 76 μm prosječna sila raste na približno 215 kN. Ovi su podaci vidljivi na grafičkom prikazu na slici 57.

Slika 58 prikazuje površinu analiziranog otkovka dobivenog plitkim gravurnim kovanjem od Al 99,5 sa označenim dijelom površine (geometrija detalja je najmanjih dimenzija na cjelokupnoj površini otkovka) na kojem je provedena analiza kvalitete otiska.

Na slikama 59 i 60 prikazani su snimljeni označeni dijelovi površine sa istaknutim detaljima koji se na njima uočljivo razlikuju. Radi se o opisanim površinama uzoraka čije su veličine zrna 39 i 76 μm kod ukupne deformacije 800 μm.



Slika 58. *Površina ispitnog uzorka sa označenim detaljem na kojem je provedena analiza kvalitete otiska.*



Slika 59. *Površina uzorka od Al 99,5 veličine zrna 76μm kod ukupne deformacije 800μm.*



Slika 60. *Površina uzorka od Al 99,5 veličine zrna 39μm kod ukupne deformacije 800μm.*

4.3. Zavisnost maksimalnog specifičnog pritiska o stupnju deformacije rondele kod slobodnog kovanja

Nakon provedenih mjerenja parametara procesa i obrade dobivenih rezultata izvršena je procjena zavisnosti maksimalnog specifičnog pritiska o stupnju deformacije obratka. Ova procjena učinjena je mjerenjem deformiranih ispitnih uzoraka. Mjerenjem dva međusobno okomita promjera deformiranih uzoraka određena je prosječna površina baze deformirane rondele za različite sile deformiranja i za sve tri veličine kristalnog zrna. Mjerenje je provedeno na svim ispitnim uzorcima koji su ušli u proces obrade podataka, a iskazane veličine odnose se na aritmetičke sredine dobivenih vrijednosti.
Vrijednosti maksimalnog specifičnog pritiska i logaritamskog stupnja deformacije izračunati su iz sljedećih izraza:

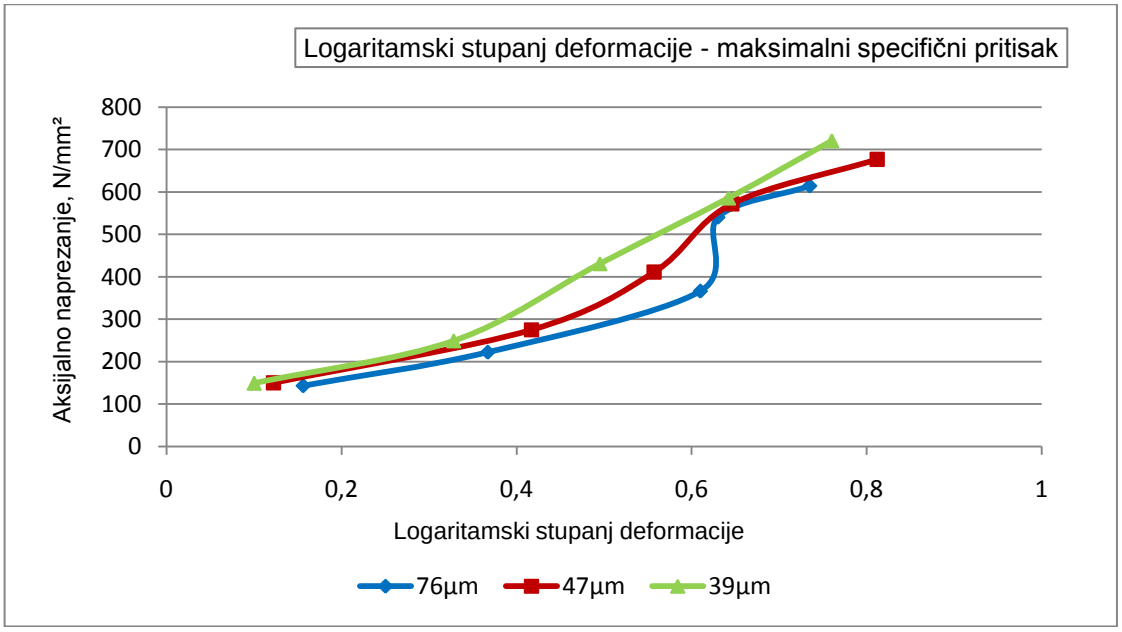
$$p = \frac{F}{A}, \text{ N/mm}^2 \tag{33}$$

$$\varphi = ln\frac{h_0}{h_1} \tag{34}$$

Ovdje A, mm^2, predstavlja tlačenu površinu baze uzorka, F, N, je sila oblikovanja, h_0, mm, je početna visina uzoraka 2 mm, a h_1, mm, je konačna visina uzorka nakon oblikovanja.

U tablici 20 u Dodatku[14] dati su rezultati izračuna maksimalnog specifičnog pritiska i logaritamskog stupnja deformacije, a dijagram zavisnosti maksimalnog specifičnog pritiska o logaritamskom stupnju deformacije za sve tri promatrane veličine kristalnog zrna prikazan je na slici 61.

[14] Poglavlje 7. - Dodatak



Slika 61. *Odnos maksimalnog specifičnog pritiska i logaritamskog stupnja deformacije za sve tri veličine kristalnog zrna.*

Svakako je potrebno naglasiti kako porastom kristalnog zrna za isti stupanj deformacije dolazi do smanjivanja veličine maksimalnog specifičnog pritiska. Ovo smanjivanje matematička je posljedica smanjivanja sile oblikovanja za istu tendenciju promjene ukupne deformacije i veličine kristalnog zrna pri slobodnom kovanju Al 99,5.

4.4. Sažimanje rezultata eksperimenta i verifikacija hipoteze

Nakon opsežnog prikaza svih rezultata provedenog eksperimentalnog istraživanja potrebno je napraviti kratki sažetak iznesenih podataka kako bi se mogao donijeti zaključak o njihovom značenju.

Provedena su, eksperimentalna ispitivanja dva procesa kovanja jednakih ispitnih uzoraka (Al 99,5%, ϕ=20 mm, h_0=2 mm, u tri veličine kristalnog zrna: 39, 47 i 76 µm). Prvo ispitivanje odnosilo se na slobodno kovanje pri čemu je dopušteno slobodno radijalno tečenje materijala, a drugo ispitivanje odnosilo se na plitko gravurno kovanje pri čemu je tečenje materijala ograničeno gravurom ukovnja.

Cilj eksperimenata bio je utvrditi međudjelovanje sljedećih parametara procesa[15]:

- sile oblikovanja,
- veličine kristalnog zrna,
- ukupne deformacije,
- elastičnog povrata materijala,

[15] Način i razlog odabira ovih parametara procesa opisani su u 4.1.1. i 4.2.2.

kako bi se potvrdila hipoteza o plitkom gravurnom kovanju kao procesu mikrooblikovanja. Pri tome su oba eksperimenta provedena uz dvofaktorski plan pokusa.

U procesu slobodnog kovanja kao utjecajni faktori odabrani su sila oblikovanja i veličina kristalnog zrna. Promatrao se njihov utjecaj na ukupnu deformaciju i elastični povrat. U procesu kovanja u gravuri utjecajni faktori postaju ukupna deformacija i veličina zrna, a mjeri se njihov utjecaj na silu oblikovanja i elastični povrat. Zamjena mjesta ulaznih i izlaznih veličina učinjena je zbog različitih mogućnosti mjerenja u ova dva slučaja. Međutim, s obzirom na to da se željelo dobiti međuodnos svih veličina u svakom pojedinačnom slučaju, postaje nevažno na kojem mjestu (ulazne ili izlazne) se one nalaze.

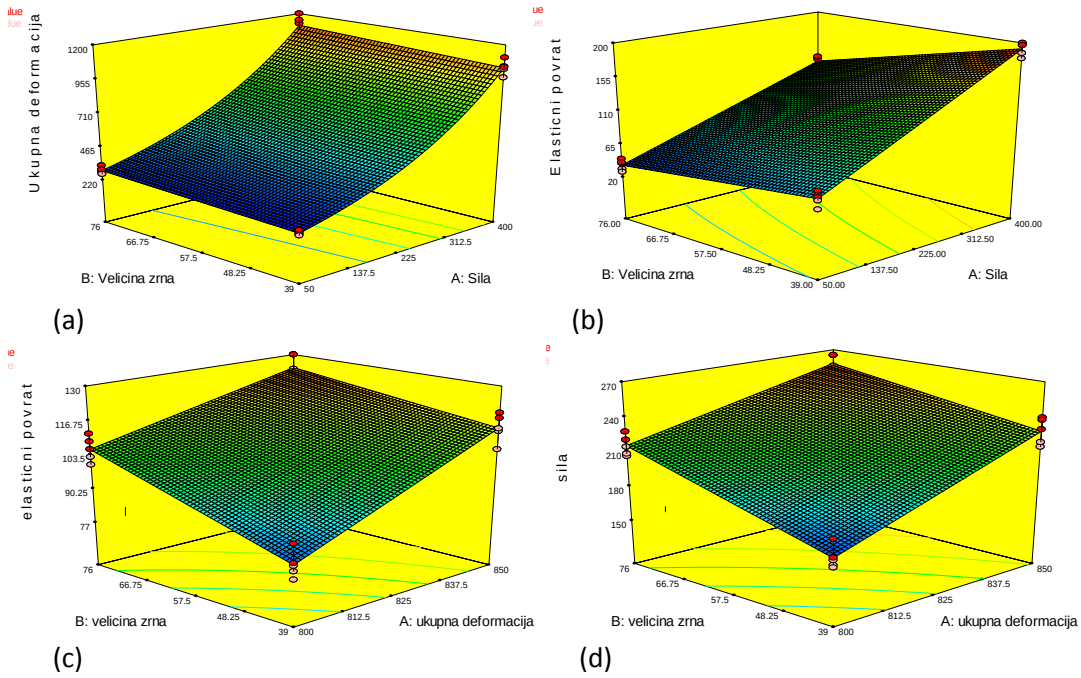
Rezultati su pokazali sljedeće:

- Kod procesa slobodnog kovanja porastom veličine zrna za isti iznos sile oblikovanja dolazi do značajnog smanjenja elastičnog povrata i nešto manje značajnog porasta ukupne deformacije.
- Kod procesa kovanja u gravuri smanjenjem veličine zrna i smanjenjem ukupne deformacije dolazi do smanjenja elastičnog povrata i smanjenja sile oblikovanja.

Tendencije rezultata prikazane su u tablici 16, a usporedni 3D grafički prikaz rezultata na slici 62.

Tablica 15. Pregledni prikaz tendencije ponašanja dobivenih rezultata mjerenja provedenog eksperimentalnog istraživanja.

↔ jednako ↑ porast ↓ smanjenje	**Sila oblikovanja**	**Veličina zrna**	**Ukupna deformacija**	**Elastični povrat**
Slobodno kovanje	↔	↑	↑	↓
Kovanje u gravuri	↔	↑	↓	↑



Slika 62. *Usporedni prikaz odzivnih površina mjerenih veličina u ovisnosti o ulaznim parametrima: a) 3D prikaz utjecaja sile i veličine zrna na ukupnu deformaciju kod slobodnog kovanja, b) 3D prikaz utjecaja sile i veličine zrna na elastični povrat kod slobodnog kovanja, c) 3D prikaz utjecaja veličine zrna i ukupne deformacije na elastični povrat kod plitkog gravurnog kovanja, d) 3D prikaz utjecaja veličine zrna i ukupne deformacije na silu oblikovanja kod plitkog gravurnog kovanja.*

Verifikacija rezultata eksperimenta provedena je statističkom analizom pomoću programskog paketa Design-Expert.

U slučaju kovanja u gravuri potvrđena je ispravnost modela za obje mjerene veličine, odabrani utjecajni faktori pokazali su se signifikantnima, a regresijskom analizom dobivene su i jednadžbe odzivnih površina za obje izlazne veličine. Provjerom dobivene jednadžbe sa rezultatima eksperimenta nailazi se na maksimalno odstupanje pojedinih točaka eksperimenta od izračunate odzivne površine za približno 15%.

U slučaju slobodnog kovanja, kako je vidljivo u analizi provedenog eksperimenta, izlazna veličina ukupnog pomaka slijedi određeno ponašanje samo do veličine sile oblikovanja od 250 kN. Nakon te točke dolazi do međusobnog križanja izlaznih krivulja za pojedine veličine kristalnog zrna. Zbog ovakvih rezultata, u statističkoj analizi, bilo je potrebno provesti logaritamsku transformaciju dobivenih podataka čime se dobila jasnija slika utjecaja faktora. Za elastični povrat kao izlaznu veličinu rezultati su jasno pokazali signifikantnost odabranih utjecajnih faktora bez potrebe provođenja transformacije dobivenih podataka. Također, i u ovom slučaju, regresijskom analizom dobivene su jednadžbe odzivnih površina. Jednadžba za elastični povrat vrlo dobro

odgovara eksperimentalnim rezultatima, dok jednadžba za ukupni pomak pokazuje odstupanja do 18% u pojedinim točkama.

Naknadnim mjerenjem deformiranih uzoraka i izračunom potrebnih veličina pokazano je smanjenje maksimalnog specifičnog pritiska za isti logaritamski stupanj deformacije u slučaju većeg kristalnog zrna.

Ovakvi rezultati potvrdili su hipotezu koja kaže da se u procesima mikrooblikovanja promatrane veličine ponašaju oprečno s obzirom na mogućnost slobodnog tečenja materijala[16].

Nadalje, površina dobivenih kovanica promatrana je stereomikroskopom. Uočeno je bolje popunjavanje gravure čak i pri manjoj sili za sitniju kristalnu strukturu.

Nakon razmatanja dobivenih rezultata moguće je, dakle, dati sljedeće preporuke kako bi se smanjila mogućnost pojave problema uzrokovanih mikrostrukturom kod plitkog gravurnog kovanja:

- U slučaju slobodnog tečenja materijala, ili vrlo malog ograničavanja tečenja, te ukoliko se radi o gravuri čija je geometrija oblika većih dimenzija, povoljnijom se pokazuje krupnozrnata struktura.
- U slučaju kovanja u gravuri, naročito ako gravura posjeduje geometriju oblika vrlo malih dimenzija, svakako se preporučuje što sitnija mikrostruktura.

[16] Odlomci 1.3. i 3.2.

5. RAČUNALNA SIMULACIJA

5.1. Definiranje modela

Treći dio istraživanja odnosi se na analizu problema promjene kontaktnog trenja promjenom veličine kristalnog zrna. Ova pojava karakterizira sve procese mikrooblikovanja. Kontaktno trenje analizirat će se numeričkom simulacijom korištenjem metode konačnih elemenata.

Cilj ovog dijela istraživanja jest prikaz ovisnosti promjene trenja obzirom na promjenu veličine zrna kod slobodnog kovanja. Iako bi bilo vrlo interesantno provesti jednako istraživanje za proces kovanja u ukovnju, u ovom slučaju to nije bilo moguće. Naime, da bi se simulacija procesa mogla točno izvesti potrebno je načiniti trodimenzionalno snimanje površine gravure ukovnja te takvu snimljenu površinu pretvoriti u odgovarajući format zapisa. No, zbog detalja na gravuri ukovnja koji su vrlo malih dimenzija, nije moguće dobiti dovoljno dobru trodimenzionalnu sliku površine, a okrnjena površina ne bi dala relevantne rezultate.

Simulacija slobodnog kovanja izvedena je u programskom paketu MSC Marc Mentat. Pri tom je izrađen osnosimetrični 2D model konvertiran u mrežu konačnih elemenata. Materijal je definiran kao izotropni elastoplastični. Konstante u elastičnom području za Al 99,5 iznose: Youngov modul elastičnosti E = 69000 N/mm^2, Poissonov faktor υ = 0,33.

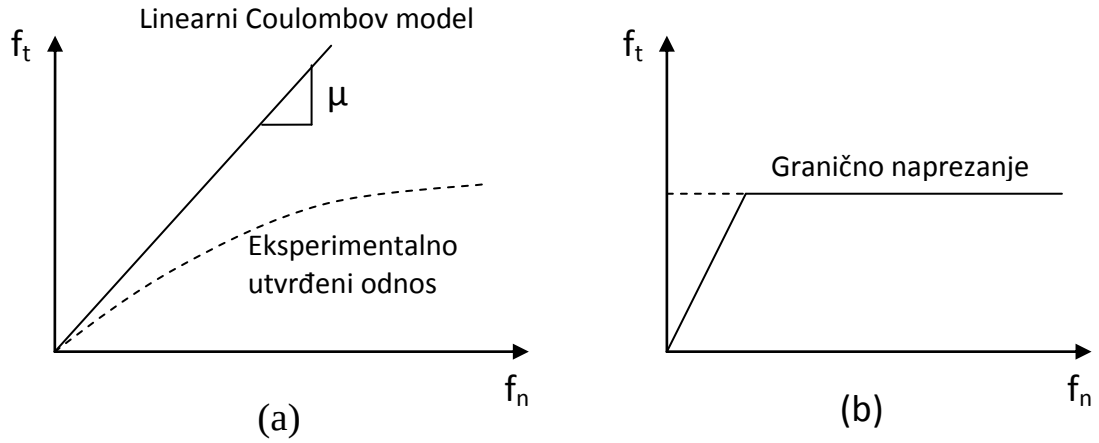
Izotropna plastičnost modelirana je unošenjem eksperimentalno dobivenih rezultata maksimalnog specifičnog pritiska u zavisnosti o logaritamskom stupnju deformacije za sve tri promatrane veličine kristalnog zrna.

Trenje je definirano modificiranim Coulombovim bilinearnim modelom. Coulombov model dan je izrazom:

$$f_t \leq -\mu f_n t \text{ , N} \tag{35}$$

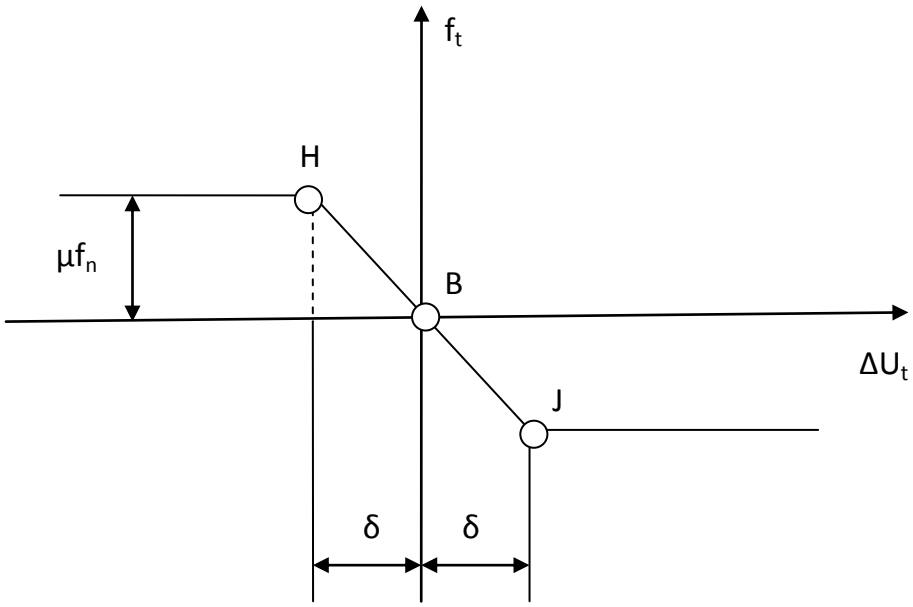
Gdje je f_t , N tangencijalna sila – sila trenja u pojedinom čvoru, μ je faktor trenja, f_n , N je normalna sila u čvoru i t je tangencijalni jedinični vektor u smjeru relativne brzine gibanja.

Modifikacija se sastoji u tome da za velike iznose normalne sile f_n eksperimentalno utvrđeni odnos sile trenja i normalne sile ne prati Coulombov model dan prethodnim izrazom kako to prikazuje slika 63 a. Zbog toga se postavlja pretpostavka da je sila trenja u pojedinom čvoru proporcionalna naprezanju trenja u tom istom čvoru i koristeći pojam graničnog naprezanja pri određivanju trenja postavlja se ovisnost naprezanja trenja o normalnom naprezanju kako to shematski pokazuje slika 63 b [29].



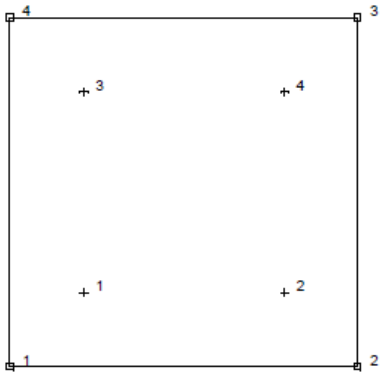
Slika 63. *Modifikacija Coulombovog modela trenja: (a) Coulombov model i eksperimentalno utvrđena ovisnost trenja o normalnoj sili, (b) shematski prikaz modificiranog modela koji se koristi u numeričkoj simulaciji [29].*

Bilinearnost modela odnosi se na ovisnost trenja o pomaku čvora. Ta ovisnost u slučaju da je $\delta = 0$ (nema pomaka čvora) skokovito mijenja iznos sile trenja uzrokujući numeričku nestabilnost, pa je potrebno linearizacijom $\overline{BH}$ i $\overline{BJ}$, odnosno bilinearnom modifikacijom $\delta \neq 0$, riješiti navedeni problem – slika 64.



Slika 64. *Bilinearni Coulombov model trenja, f_t – sila trenja, ΔU_t – ukupni pomak čvora [29].*

Zbog jednostavnosti i širokog dijapazona primjene u modeliranju osnosimetričnih postupaka oblikovanja [49, 50], korišten je bilinearni konačni element s četiri čvora. U korištenom programskom paketu element je označen brojem 10. Pri modeliranju kontakta kod slobodnog kovanja dolazi do izražaja svojstvo stabilnosti odabranog linearnog elementa[17]. Sa slici 65 prikazan je korišteni element u kojem se prema zahtjevima programa čvorovi numeriraju u pozitivnom smjeru. Ovakav element opterećen je ravnomjernim pritiskom na stranicu 3-4.

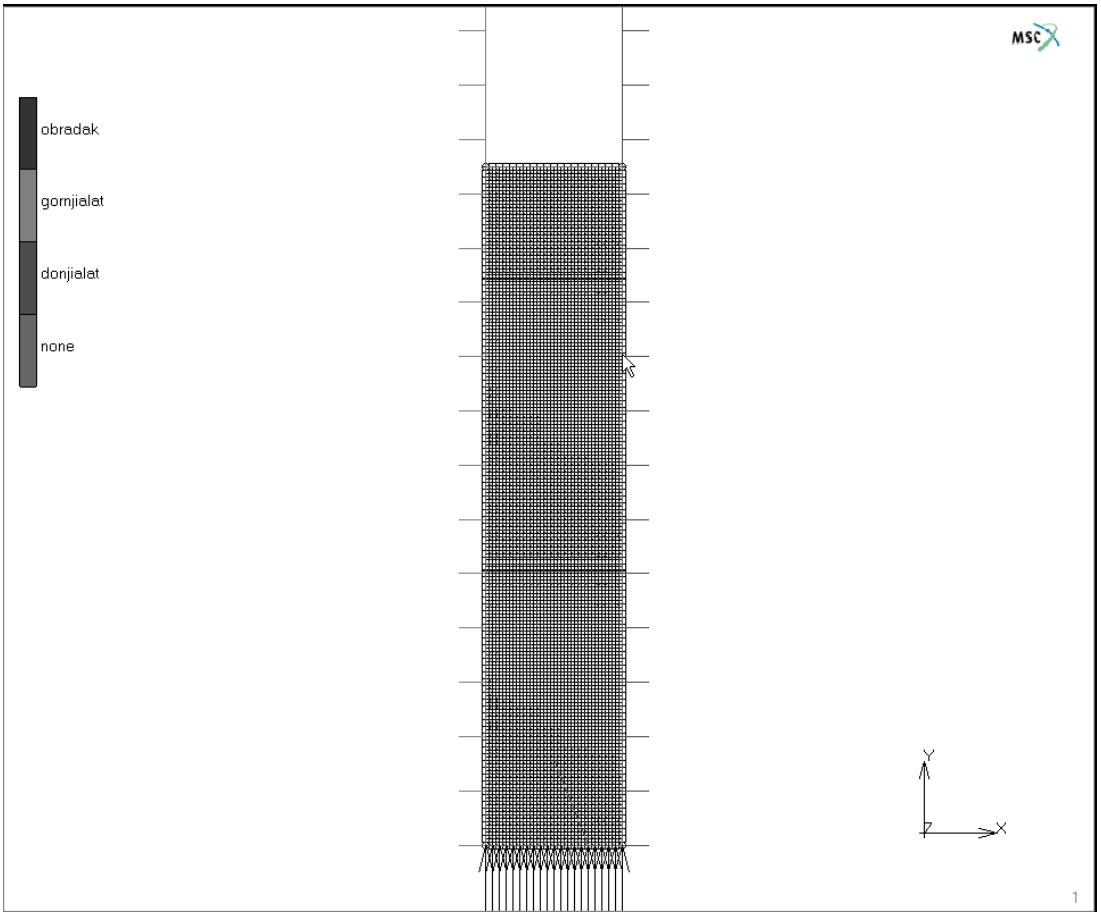


Slika 65. *Bilinearni konačni element s četiri čvora, element broj 10. [50]*

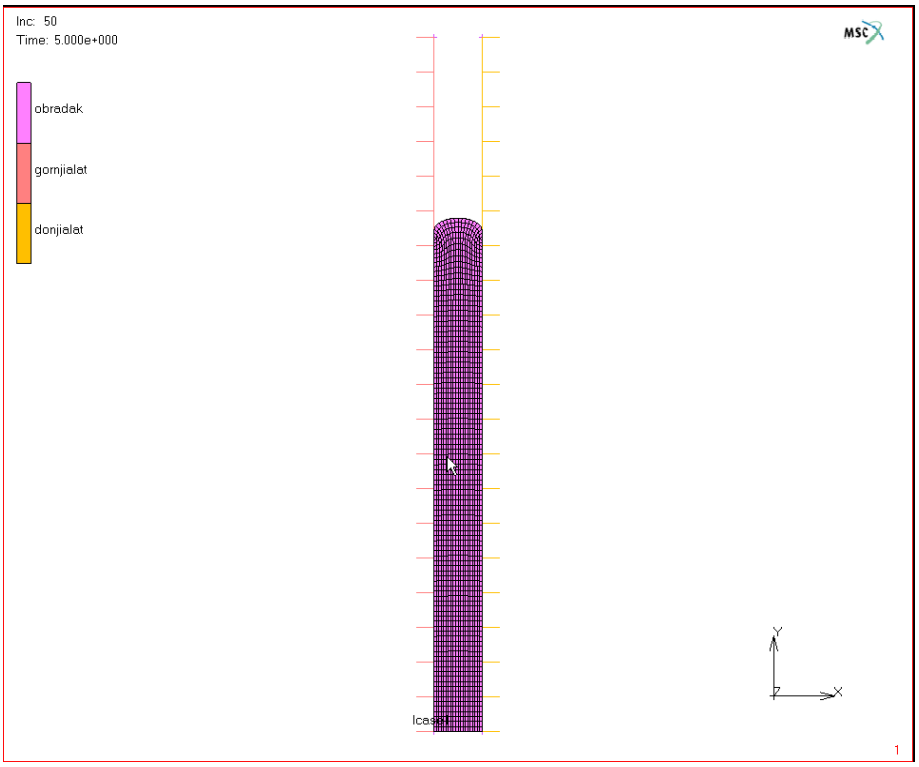
[17] Iako postoji mogućnost korištenja, elementi višeg reda nisu korišteni, budući kod modeliranja većih stupnjeva deformacije induciraju probleme sa konvergencijom, osobito ako u simulaciji postoji kontakt s trenjem kao u problemu slobodnog kovanja.

Model je izrađen od 2000 (20 elemenata u smjeru osi x te 100 elemenata u smjeru osi y) konačnih 2D elemenata tipa 10 te uspješno modelira slobodno kovanje do logaritamskog stupnja deformacije $\varphi = 0,6$.

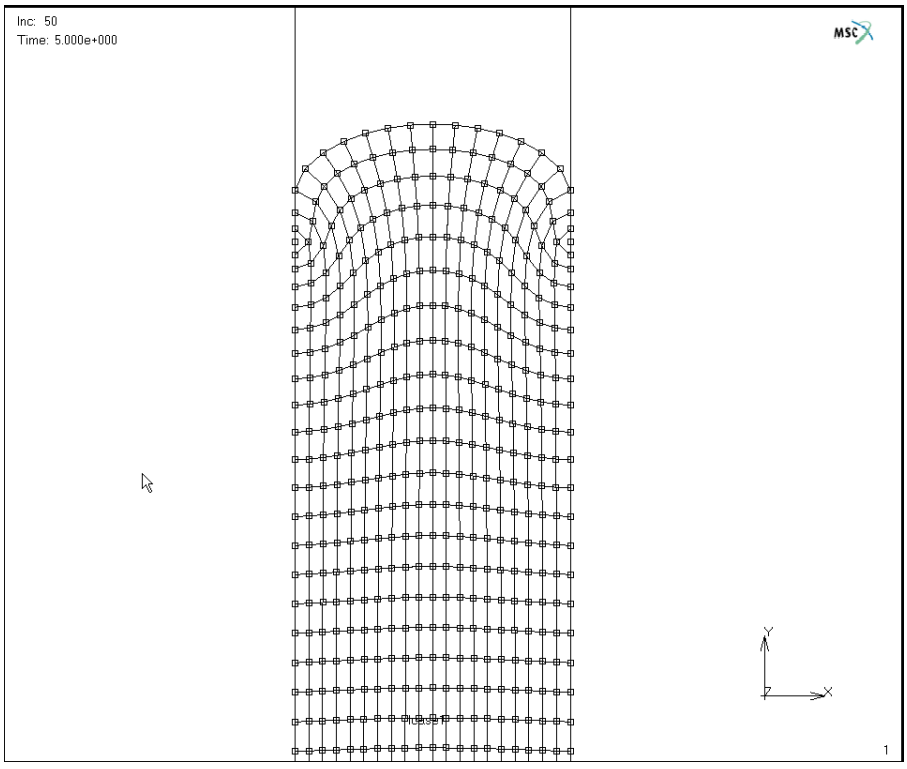
Slika 66.a prikazuje nedeformiranu mrežu konačnih elemenata osnosimetričnog modela slobodnog kovanja. Slika 66.b prikazuje deformiranu mrežu na cjelokupnoj modeliranoj geometriji, a slika 66.c prikazuje detalj deformirane mreže sa najvećom distorzijom.



a)



b)



c)

Slika 66. *2D osnosimetrični model slobodnog kovanja sa mrežom konačnih elemenata tipa 10: a) Nedeformirani model, b) Deformirani model kod najvećeg stupnja deformacije, c) Povećani detalj najveće distorzije mreže konačnih elemenata na deformiranom modelu kod najvećeg stupnja deformacije.*

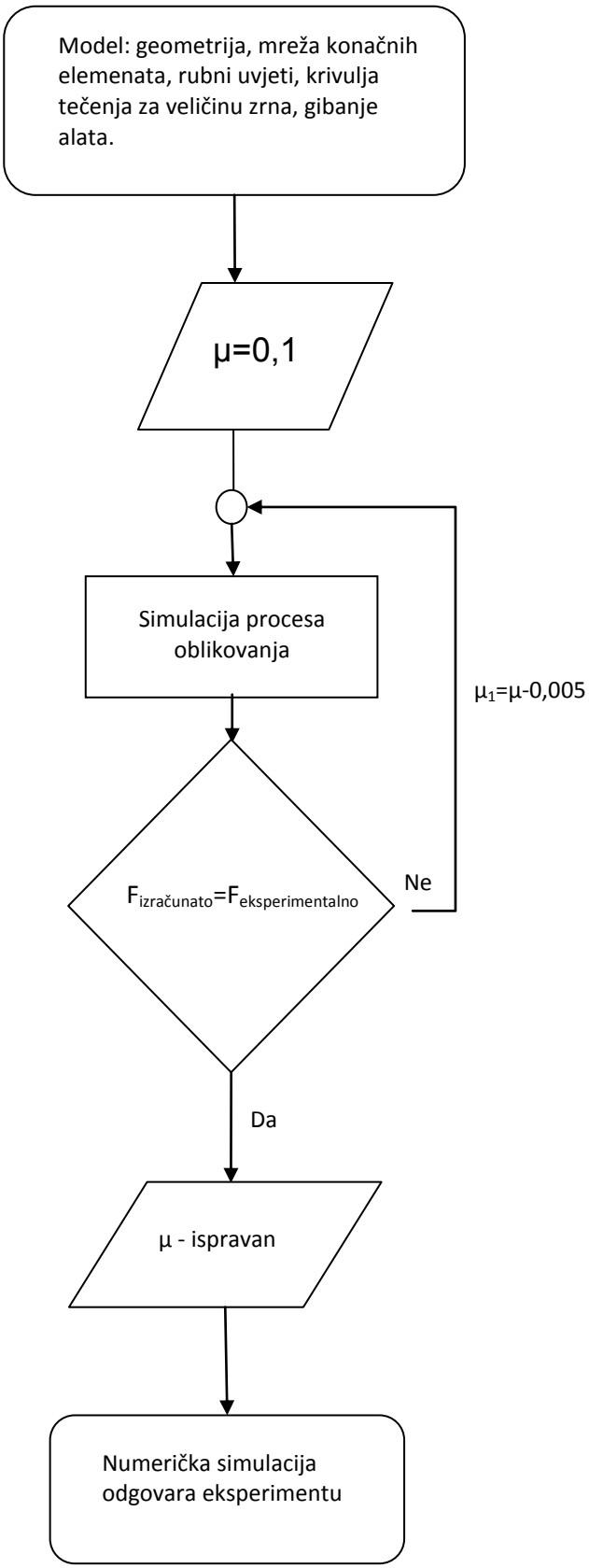
5.2. Algoritam određivanja veličine faktora trenja

Poznatim konstantama kojima se definiraju svojstva materijala u elastičnom području, poznatom geometrijom osnosimetričnog 2D modela, eksperimentalno određenim krivuljama tečenja (kojima se definira ponašanje materijala u plastičnom području i koje su različite kod uzoraka različite veličine kristalnog zrna), definiranim rubnim uvjetima i uvjetima kontakta alata i obratka te načinom gibanja alata, određen je početak algoritma određivanja faktora trenja za oblikovanja uzoraka različite veličine kristalnog zrna. Također su poznate i eksperimentalno utvrđene izlazne veličine (iznos sile oblikovanja) koje nastojimo postići računalnom simulacijom te tako dobiti ispravan numerički model procesa kovanja.

Kao ulazna veličina, u već definirani model, uzima se faktor trenja čija se početna vrijednost pretpostavlja. Algoritam je definiran tako da se kao početna veličina faktora trenja uzima ona maksimalno pretpostavljena.

Numeričkom simulacijom procesa izračunavaju se izlazne veličine – sila oblikovanja koja se provjerava uspoređivanjem s eksperimentalno dobivenom silom. Ako veličina izračunate sile ne odgovara veličini eksperimentalno dobivene, faktor trenja u modelu smanjuje se za 0,005 i vrši se ponovljena simulacija procesa. Postupak se ponavlja sve dok se provjerom ne ustanovi podudaranje izračunate sile sa eksperimentalnom u rasponu od ±10%. U tom slučaju faktor trenja se smatra ispravnim i uzima kao izlazna veličina.

Na slici 66 grafički je prikazan opisani algoritam određivanja faktora trenja kod slobodnog kovanja ispitnih uzoraka različite veličine kristalnog zrna.



Slika 67. *Algoritam određivanja veličine faktora trenja kod slobodnog kovanja uzoraka različite veličine kristalnog zrna.*

5.3. Rezultati računalne simulacije

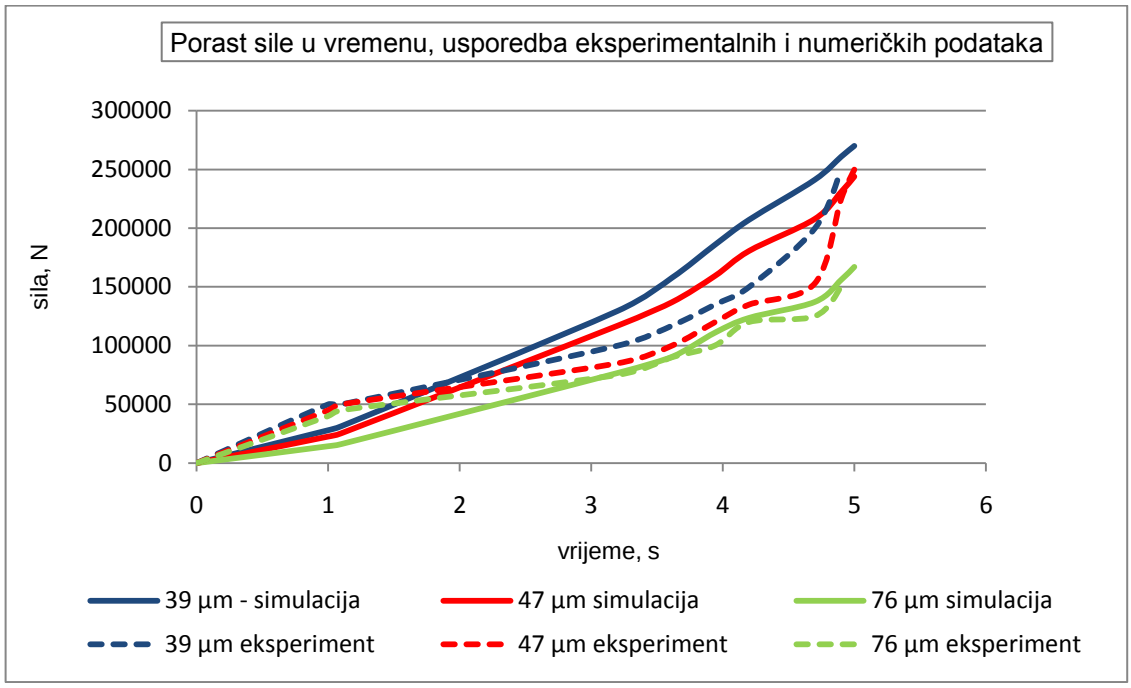
Prema opisanom algoritmu izvršena je simulacija oblikovanja na 2D osnosimetričnom modelu. Postignute su maksimalne sile oblikovanja koje spadaju u predviđeni interval slaganja s eksperimentalnim vrijednostima od ±10%.

Maskimalne sile oblikovanja za obratke različite veličine kristalnog zrna odgovaraju i različitim ulaznim vrijednostima faktora trenja. Usporedni prikaz eksperimentalno dobivenih sila oblikovanja, sila oblikovanja dobivenih numeričkom simulacijom i pripadajućih faktora trenja za svaku od veličina kristalnog zrna dan je u tablici 17.

Tablica 16. Tablica faktora trenja dobivenih numeričkom simulacijom.

Veličina zrna, μm	Eksperimentalno dobivena sila, kN	Sila dobivena simulacijom, kN	Faktor trenja
39	275	293	0,050
47	225	244	0,040
76	155	167	0,025

Usporedni prikaz tokova sila u vremenu (eksperimentalne i dobivene simulacijom) za sve tri veličine zrna prikazan je na slici 67. Potrebno je napomenuti da su eksperimentalni podaci preračunati iz podataka o zavisnosti sile o ukupnoj deformaciji prema konstantnoj brzini alata 0,012 mm/s. Podaci dobiveni numeričkom simulacijom prema postavkama korištenog programa iskazani su u vremenu budući da se kretanje alata, u definiranju problema, prema zahtjevima korištenog softvera zadaje u vremenu.



Slika 68. *Eksperimentalni i numerički dijagrami porasta sile oblikovanja tijekom procesa slobodnog kovanja (izražen u vremenu s brzinom alata 0,012 mm/s).*

Iz prikazanih rezultata očito je da veličina faktora trenja opada porastom kristalnog zrna.

Iskazano jednadžbom, veličina faktora trenja mogla bi se opisati kao:

$$\mu = -0{,}0122 + 0{,}00021 \cdot F + 0.00003 \cdot \phi_z \qquad (36)$$

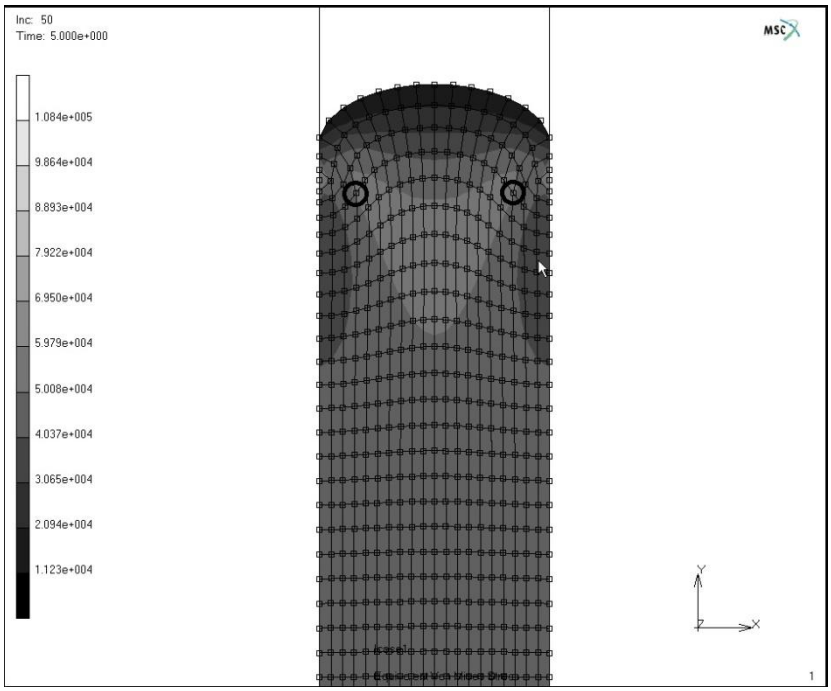
Pri čemu je veličina sile F, N oblikovanja uzeta iz podataka dobivenih numeričkom simulacijom, a ϕ_z, µm je eksperimentalno dobiveni prosječni promjer kristalnog zrna.

5.3.1. Prikaz naprezanja i sile oblikovanja dobivenih numeričkom simulacijom

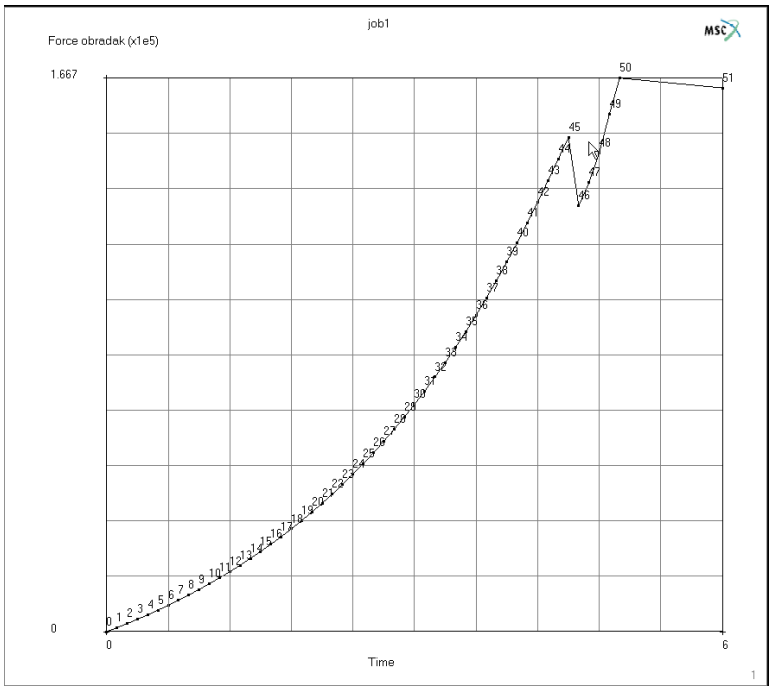
Na slikama 69-74 prikazani su raspored ekvivalentnog Von Misesovog naprezanja u obratcima na kraju oblikovanja i računalno dobiveni tok sile u vremenu za sve tri veličine kristalnog zrna. Vidljivo je nešto veće maksimalno naprezanje u materijalu obratka u slučaju sitnijeg zrna te veće sile oblikovanja također u slučaju većeg zrna kako je već naprijed opisano.

Zamjetan je matematički skok u iznosu sile u 46. inkrementu. U tom se inkrementu, naime, javlja matematička nestabilnost u dva čvora (1853 i 1863)[18] koji se nalaze simetrično na rubovima područja sa najvećim i najmanjim naprezanjem pa se, zbog matrice naprezanja koja u njima nije pozitivno definitna u prvoj iteraciji, konvergencija postiže u trećoj iteraciji.

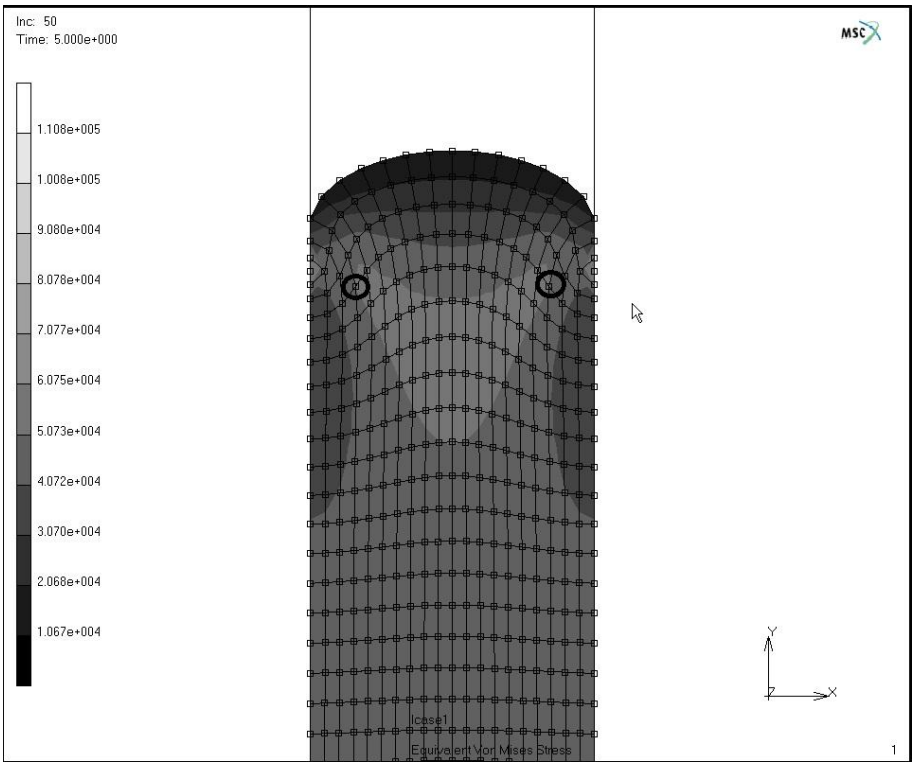
[18] Čvorovi su označeni na prikazanim slikama maksimalnih naprezanja, slike 69, 71, 73.



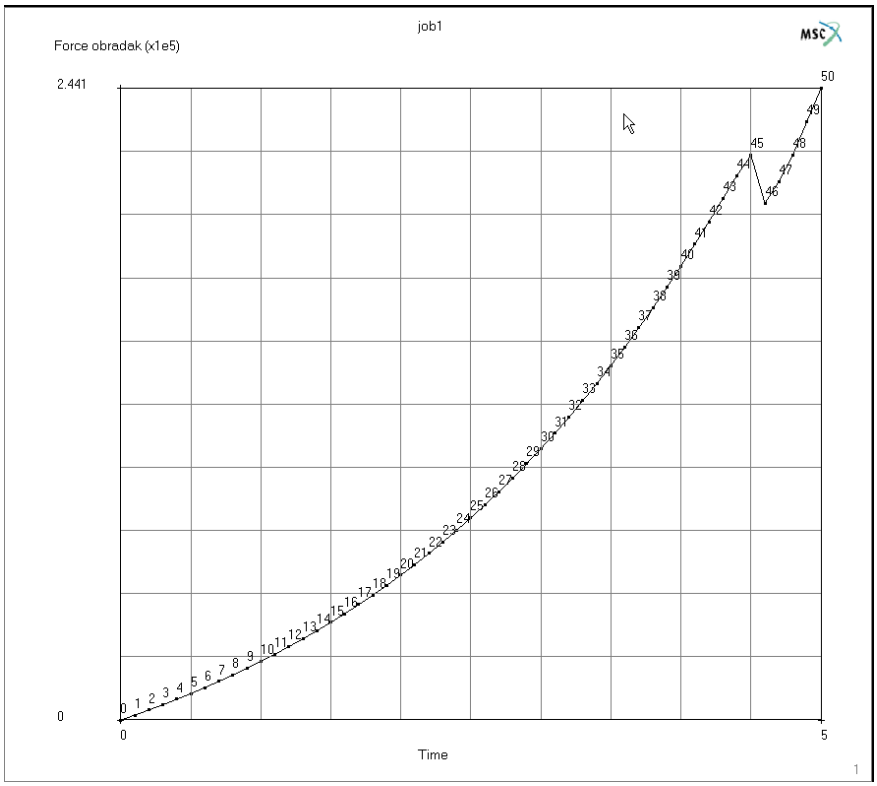
Slika 69. *Raspored maksimalnih naprezanja u obratku, veličina zrna 76 µm, trenje 0,025, maksimalna sila 167 kN.*



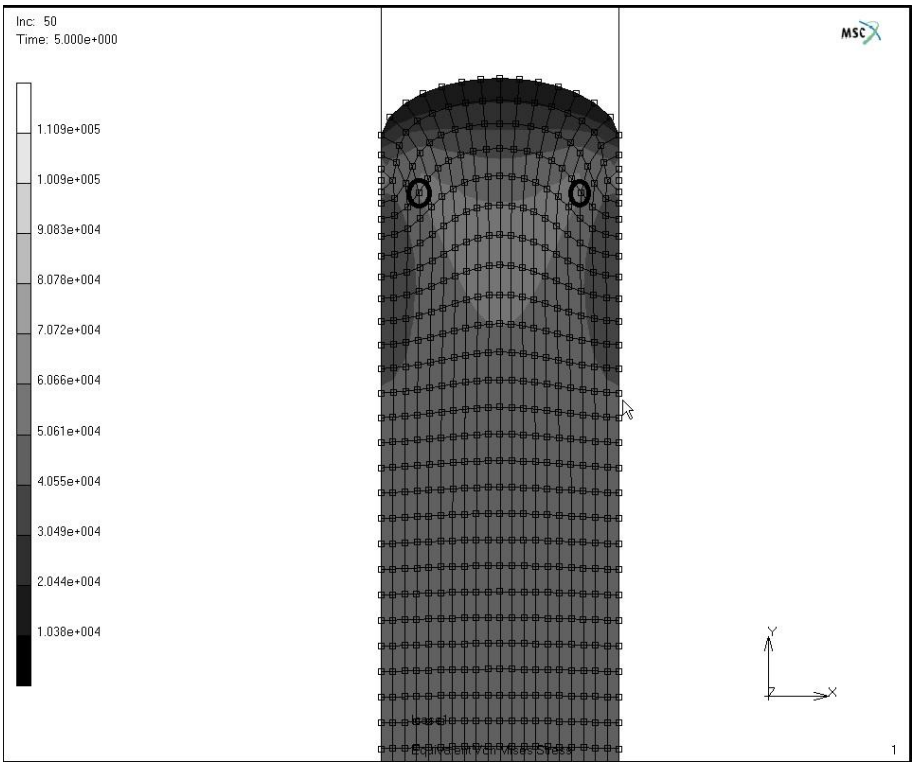
Slika 70. *Tok sile u vremenu, veličina zrna 76 µm, trenje 0,025, maksimalna sila 167 kN*



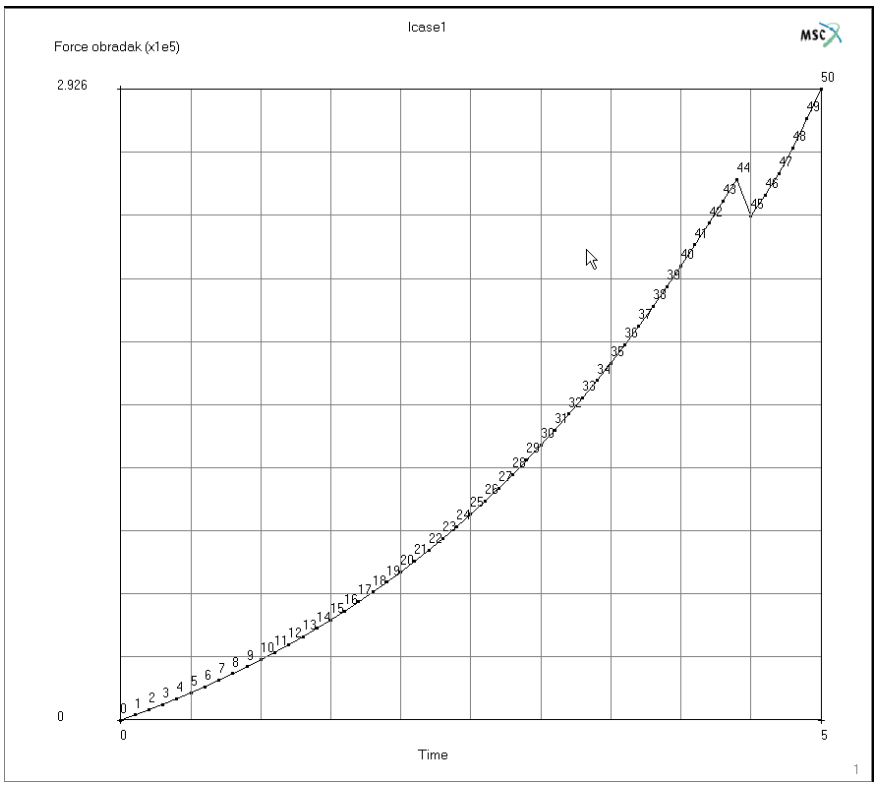
Slika 71. *Raspored maksimalnih naprezanja u obratku, veličina zrna 47 µm, trenje 0,04, maksimalna sila 244 kN.*



Slika 72. *Tok sile u vremenu, veličina zrna 47 µm, trenje 0,04, maksimalna sila 244 kN.*



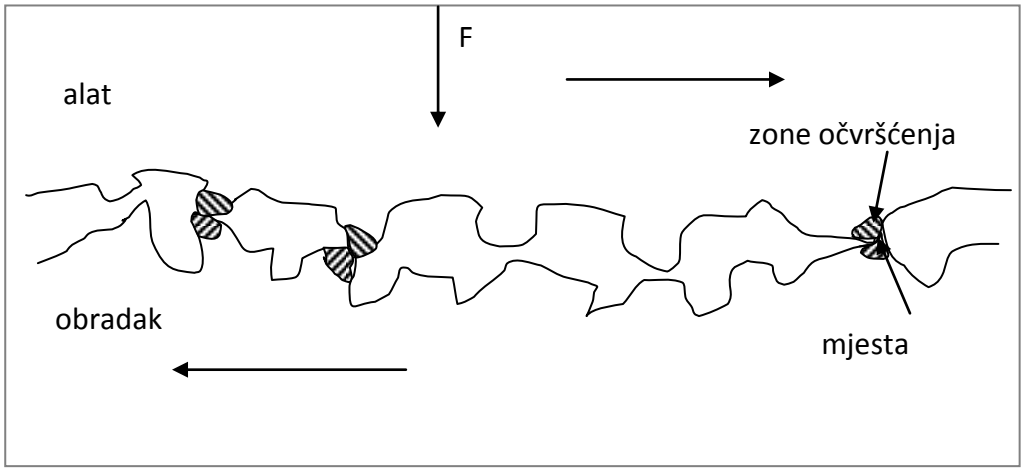
Slika 73. *Raspored maksimalnih naprezanja u obratku, veličina zrna 39 μm, trenje 0,05, maksimalna sila 293 kN.*



Slika 74. *Tok sile u vremenu, veličina zrna 39 μm, trenje 0,05, maksimalna sila 293 kN.*

5.4. Analiza razlike u veličini faktora trenja

Za objašnjavanje trenja u području oblikovanja metala deformiranjem koristi se tzv. Bowden-Taborov model trenja koji daje uvid u prirodu trenja i varijacije veličine trenja u zavisnosti od stanja površine i primijenjenih maziva. Bit je ovog modela kako je prikazano na slici 75 da su dva tijela, koja su u međusobnom dodiru, u kontaktu samo na nekim mjestima, odnosno tamo gdje se ispupčenje alata dodiruje s ispupčenjem obrađivanog materijala. Sile koje se javljaju u oblikovanju deformiranjem uglavnom su vrlo velike, a jednako tako i specifični pritisci. Kod hladne plastične deformacije ovi su pritisci redovito 2000-2500 MPa, a on se raspodjeljuje na samo neke stohastički prisutne kontakte ispupčenja. Time su ustvari lokalni pritisci vrlo veliki uslijed čega dolazi do mikrozavarivanja čestica alata i obrađivanog materijala. Ovo se zavarivanje događa u hladnom stanju ako je riječ o deformiranju u hladnom stanju, odnosno u toplom ako se postupak deformiranja odvija kod povišenih temperatura. Da bi se ostvarilo tečenje materijala, neophodno je da između ovog frikcionog para postoji relativno gibanje, što znači da se mjesta zavara moraju raskinuti. Na taj se način prema Bowden-Taboru sila trenja tumači kao suma svih smičnih sila potrebnih za prekidanje mjesta kontakta.



Slika 75. *Model trenja u oblikovanju metala deformiranjem prema Bowden-Taboru [18].*

U skladu s prikazanim modelom trenja moguće je dati i tumačenje porasta faktora trenja smanjenjem veličine kristalnog zrna obratka. Budući da nakon toplinske obrade ispitnih uzoraka nije izvršena nikakva daljnja obrada površine moguće je pretpostaviti da ukoliko je zrno sitnije teoretski postoji veći broj sitnijih izbočina na

površini materijala. Na taj se način povećava i broj mikrozavara tijekom oblikovanja deformiranjem, a uslijed toga potrebna je i veća suma smičnih sila za prekidanje ovih mjesta kontakta.

6. ZAKLJUČAK I PREPORUKE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

Kroz provedeno eksperimentalno istraživanje jasno je pokazano kako plitko gravurno kovanje nedvosmisleno pripada u skupinu procesa mikrooblikovanja. Kako bi se to dokazalo izvršeni su sljedeći koraci i dobiveni sljedeći rezultati:

- Identični ispitni uzorci oblikovani su deformiranjem na dva načina – slobodnim kovanjem i kovanjem u gravuri (plitkim gravurnim kovanjem). Procesom slobodnog kovanja omogućeno je slobodno radijalno tečenje materijala, dok je prilikom kovanja u gravuri tečenje materijala djelomice ograničeno.
- Prije početka provođenja eksperimenta ispitni uzorci toplinski su obrađeni i postignuta je jednolična mikrostruktura sa tri različite veličine kristalnog zrna.
- U procesu oblikovanja slobodnim kovanjem promatrane su promjene veličina ukupne deformacije i elastičnog povrata materijala pri promjeni sile oblikovanja i veličinu kristalnog zrna ispitnih uzoraka. Obrada dobivenih podataka pokazala je signifikantan utjecaj i sile oblikovanja i veličine kristalnog zrna na ukupnu deformaciju i elastični povrati to na sljedeći način: u slučaju krupnijeg kristalnog zrna, a pri istom iznosu sile deformiranja ukupna deformacija materijala obratka je veća, a iznos elastičnog povrata po prestanku djelovanja sile oblikovanja je manji.
- U procesu plitkog gravurnog kovanja promatrane veličine su sila oblikovanja i elastični povrat, dok su ulazni parametri bili veličina kristalnog zrna i ukupna deformacija. Za dva iznosa ukupne deformacije u kombinaciji s tri veličine kristalnog zrna mjereni su iznosi elastičnog povrata i sile oblikovanja. Obrada rezultata pokazala je također signifikantan utjecaj veličine zrna i ukupne deformacije na elastični povrat i silu oblikovanja, ali suprotno ponašanje materijala od onog kod slobodnog kovanja. Porastom kristalnog zrna za istu silu oblikovanja veličina ukupne deformacije pada, a veličina elastičnog povrata raste.

- U oba slučaja provedenog eksperimentalnog istraživanja obradom podataka – regresijskom analizom dobivene su jednadžbe površina koje jednoznačno definiraju međusobne odnose parametara procesa (jednadžbe 28, 29, 31, 32), i vrlo dobro odgovaraju eksperimentalnim podacima.
- Obzirom na postavljenu hipotezu o pripadnosti plitkog gravurnog kovanja u skupinu procesa mikrooblikovanja, ovakvi rezultati bili su i očekivani budući da odgovaraju ponašanju materijala u procesima mikrooblikovanja. Svi procesi mikrooblikovanja, naime, pokazuju oprečno ponašanje međusobno zavisnih veličina (ukupna deformacija, elastični povrat, sila oblikovanja, veličina kristalnog zrna) u slučajevima slobodnog tečenja materijala obratka nasuprot slučajevima ograničavanja njegovog tečenja.
- Nadalje, promatranjem kvalitete popunjavanja gravure ukovnja, kod procesa kovanja u gravuri, uočeno je bolje popunjavanje gravure za manje ukupne deformacije kod obradaka manje veličine kristalnog zrna.

U skladu s dobivenim rezultatima provedenog istraživanja moguće je dati preporuke za reguliranje ulaznih parametara u procesima plitkog gravurnog kovanja kako bi se izbjegli neki tipični problemi koji se tijekom ovog procesa javljaju (slabo popunjavanje gravure ukovnja, veliki elastični povrat materijala). U slučaju slobodnog tečenja materijala, ili vrlo malog ograničavanja tečenja, te ukoliko se radi o gravuri čija je geometrija oblika većih dimenzija, povoljnijom se pokazuje krupnozrnata struktura. U prilog ovoj preporuci ide i provedena numerička simulacija slobodnog kovanja koja ukazuje na povećani iznos faktora trenja u slučaju sitnijeg kristalnog zrna. U slučaju kovanja u gravuri, naročito ako gravura posjeduje geometriju oblika vrlo malih dimenzija, svakako se preporučuje što sitnija mikrostruktura.

Rekapitulacija znanstvenog doprinosa:

Plitko gravurno kovanje u radu je prikazano kao poseban slučaj mikrooblikovanja.

Dobiveni rezultati donose analizu odnosa sile, ukupne deformacije i elastičnog povrata materijala za različite veličine kristalnog zrna prilikom slobodnog kovanja i kovanja u ukovnjima. Odnosi ovih veličina definirani su jednadžbama koje jednoznačno opisuju njihove međuodnose.

Analizom kvalitete popunjavanja gravure ukovnja te uzimajući u obzir ponašanje promatranih veličina (ukupna deformacija, elastični povrat, sila oblikovanja, veličina kristalnog zrna) u uvjetima slobodnog i djelomično ograničenog tečenja materijala, dane

su smjernice o veličini kristalnog zrna materijala obratka koji će za specifičnu kombinaciju geometrije ukovnja imati zadovoljavajuća svojstva za postizanje optimalnih parametara procesa i zadovoljavajuću kvalitetu površine otkovka.

Numeričkom simulacijom dobivena je teorijska ovisnost promjene veličine kontaktnog trenja obzirom na promjenu veličine kristalnog zrna kod slobodnog kovanja za specifični promatrani slučaj korištenjem dobivenih eksperimentalnih rezultata.

Preporuke za daljnja istraživanja odnose se na testiranje koeficijenata izlaznih jednadžbi dobivenih regresijskom analizom, koje opisuju međuodnose ulaznih i izlaznih parametara, na jednakim procesima oblikovanja, ali za različite materijale. Otvara se pitanje postojanja mogućih međuodnosa ovih koeficijenata, odnosno postojanja određene zakonitosti ponašanja različitih materijala u istim uvjetima.

Računalna simulacija trebala bi ići u smjeru potvrde podataka o promjeni faktora trenja s obzirom na veličinu kristalnog zrna na 3D modelima kovanja u gravuri gdje bi se površina ukovnja dobila trodimenzionalnim snimanjem površine kovanice. U ovom slučaju to nije bilo moguće zbog izrazito sitne geometrije kojom je površina kovanica definirana.

7. DODATAK

Tablica 17. Sila oblikovanja za različite ukupne pomake alata i različite veličine kristalnog zrna.

	Sila oblikovanja za različite veličine zrna, kN		
Ukupni pomak alata, μm	39μm	47μm	76μm
800	160,9914	173,5272	209,0453
	167,2593	173,5272	206,9560
	158,9021	186,0630	221,5811
	181,8844	192,3309	215,3132
	165,1700	183,9737	227,8490
850	219,4918	211,1346	265,4564
	215,3132	225,7597	248,7420
	240,3848	225,7597	252,9206
	238,2955	242,4741	255,0099
	229,9383	236,2062	265,4564

Tablica 18. Elastični povrat materijala za različite veličine kristalnog zrna i različite ukupne deformacije (ukupne pomake alata).

	Elastični povrat za različite veličine zrna, μm		
Ukupna deformacija, μm	39mikrom	47mikrom	76mikrom
800	81	92	102
	84	88	112
	88	95	108
	90	95	117
	90	98	112
850	108	110	128
	95	106	125
	101	105	122
	109	109	126
	99	107	130

Tablica 19. Rezultati izračuna maksimalnog specifičnog pritiska i logaritamskog stupnja deformacije.

Veličina zrna, μm	$\bar{A}$, mm^2	F, kN	p, N/mm^2	φ
39	333,1	50	150,1	0,12
	439,1	100	227,7	0,42
	486,7	200	410,9	0,56
	524,5	300	571,9	0,65
	591,1	400	676,8	0,81
47	336,5	50	148,6	0,10
	400,9	100	249,4	0,33
	464,3	200	430,8	0,49
	529,8	300	586,4	0,64
	555,0	400	720,7	0,76
76	349,5	50	143,1	0,16
	429,5	100	222,3	0,37
	545,8	200	366,4	0,61
	550,2	300	540,0	0,63
	582,9	400	614,2	0,73

8. LITERATURA

[1] H. Ike, M. Plančak, Coining process as a means of controlling surface microgeometry, Journal of Materials Processing Technology 80-81 (1998), 101-107.

[2] N. Bay, T. Wanheim, Real area of contact between a rough tool and a smooth workpiece at high normal pressures, Wear, 38 (2), 1976, 201-209.

[3] N. Bay, T. Wanheim, Real area of contact and friction stress at high pressure sliding contact, Wear, Vol. 38-2 , 1976, 225-234.

[4] M.P.F. Sutcliffe, (1988) *Surface asperity deformation in metal forming processes* International Journal of Mechanical Sciences, 30 (11). pp. 847-868. ISSN 0020-7403.

[5] A. Makinouchi, H. Ike, M. Murakawa, N. Koga, A finite element analysis of flattening of surface asperities by perfectly lubricated rigid dies in metal working processes, Wear, 128 (2), 1988,109-122

[6] H. Ike, Surface deformation vs. bulk plastic deformation – a key for microscopic control of surfaces in metal forming, Journal of Materials Processing Technology 138 (2003), 250-255.

[7] A. Forcelese, L. Fratini, F. Gabrielli, F. Micari, The evaluation of springback in 3D stamping and coining processes, Journal of Materials Processing Technology 80–81 (1998), 108–112.

[8] B.Y. Jun, S.M. Kang, M.C. Lee, R.H. Park, M.S. Joun, Prediction of geometric dimensions for cold forgings using the finite element method, Journal of Materials Processing Technology 189, 2007, 459-465.

[9] M. Geiger, A. Melner, U. Engel, Production of Microparts – Size Effects in Bulk Metal Forming, Similarity Theory, Production Engineering 4 (1997) 1, 55-58.

[10] S.K. Byun, B.W. Huh, B.S. Kang, Finite-element analysis and design in the combined precision forming of bending and coining with experimental measurement, Journal of Materials Processing Technology 94 (1999), 167-174.

[11] C.J. Wang, D.B. Shan, J. Zhou, B. Guo, L.N. Sun, Size effects of the cavity dimension on the microforming ability during coining process, Journal of Materials Processing Technology 187-188 (2007) 256-259.

[12] M. Geiger, M. Kleiner, R. Eckstein, N. Tiesler, U. Engel, Microforming, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 50 (2), 2001, 445-462.

[13] F. Volertsen, Z. Hu, H. Schulze Niehoff, C. Thieler, State of the art in micro formng and investigations into micro deep drawing, Journal of Materials Processing Technology 151, 2004, 70-79.

[14] K.F. Zhang, L. Kun, Classification of size effects, similarity evaluating method in micro forming, Journal of Materials Processing Technology, 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.11.018.

[15] Y.C. Chang, Z.M. Hu, B.S. Kang, T.A. Dean, A study of cold ironing as a post-process for net-shape manufacture, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42, 2002, 945-952.

[16] H.W. Jeong, S. Hata, A. Shimokohbe, Microforming of Three-Dimensional Microstructures from Thin-Film Metallic Glass, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 12, No. 1, Feb. 2003, 42-52.

[17] T. Meinders, I.A. Burchitz, M.H.A. Bonte, R.A. Lingbeek, Numerical product design: Springback prediction, compensation and optimisation, International Journal of Machne Tools & Manufacture 48, 2008, 499-514.

[18] M. Math, Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem, FSB, Zagreb, 1999.

[19] B. Devedžić, Osnovi teorije plastičnog deformisanja, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1975.

[20] A. Povrzanović, Odabrana poglavlja obrade metala deformiranjem, FSB, Zagreb, 1996.

[21] U. Engel, R. Eckstein, Microforming - from basic research to its realization, Journal of Materials Processing Technology 125-126, 2002, 35-44.

[22] H. Justinger, G. Hirt, Estimation of grain size and grain orientation influence in microforming processes by Taylor factor considerations, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009), 2111-2121.

[23] T. Altan, Predicting springback and air bending, straight flanging, Stamping Journal, October 9, 2003.

[24] L.V. Raulea, A.M. Goijaerts, L.E. Govaert, F.P.T. Baaijens, Size effects in the processing of thin metal sheets, Journal of Materials Processing Technology 115 (2001), 44-48.

[25] B. Devedžić, Obrada metala deformisanjem, Naučna knjiga, Beograd, 1984.

[26] I. Šošić, Primijenjena statistika, Školska knjiga, Zagreb, 2006.

[27] D. Krumes, Toplinska obradba, SFSB, Slavonski Brod, 2000.

[28] J.R. Davis & Associates, Aluminium and Alminium Alloys, ASM International Handbook Comitee, Published by ASM International, 1993.

[29] Grupa autora, "MSC.Marc: User´s Guide," 2005.

[30] S. Hadživuković, Planiranje eksperimenata, Privredni pregled, Beograd, 1977.

[31] Grupa autora, "MSC.Marc Volume E: Demonstration problems," 2005.

[32] B.O. Oyerkanmi, T.A. Hughes, A.N. Bramley, A Microstructural Evaluation Technique for Determination Studies in Metal Forming Processes, Jurnal of Materials Processing Technology, 21, 1990, 75-89.

[33] J. Cao, N. Krishan, Z. Wang, H. Lu, W.K. Liu, A. Swanson, Microforming: Experimantal Investigation of the Extrusion Process for Micropins and its Numerical Simulation Using RKEM, Transactions of ASME, Vol.126, November 2004, 642-652.

[34] K. Bond, Microforming Processes - Fundamental Studies and Developments, Northwestern University, Evanson, 2008.

[35] M.G. Lee, J.H. Kim, K. Chung, S.J. Kim, R.H. Wagoner, H.Y. Kim, Analytical sprngback model for lightweight hexagonal close-packed sheet metal, International Journal of Plasticity, 2008, doi: 10.1016/j.ijplas.2008.04.005.

[36] X. Lu, R. Balendra, Finite element simulation for die-cavity compensation, Journal of Materials Processing Technology, 115, 2001, 227-232.

[37] S. Yoshida, S. Ando, Crystal structure and microwavw permeability of very thin Fe-Si-al flakes produced by microforging, Journal of Applied Physics, Vol. 93, No. 10, May 2003, 6659-6661.

[38] S. E. Rusinoff, Forging and forming metals, American Technical Society, Chicago, 1952.

[39] W.D. Carden, L.M. Geng, D.K. Matlock, R.H. Wagoner, Measurement of springback, International Journal of Mechanical Sciences 44 (2002), 79-101.

[40] K.P. Li, W.P Carden, R.H. Wagoner, Simulation of springback, International Journal of Mechanical Sciences 44 (2002), 103-122.

[41] T. Matsuoka, K. Sakaguchi, T. Mukai, M. Matsuyama, R. Yoshioka, Effects of the Grain Size on Friction and Wear Properties of ZK60 Magnesium Alloy, Journal of the Society of Metals Science 51 (2000), 1154-1159.

[42] T. El-Raghy, P- Blau, M.W. Barsoum, Effect of grain size on friction and wear behavior of Ti_3SiC_2, Wear 238 (2000), 125-130.

[43] T. A. Kals, R. Eckstein, Miniaturization in sheet metal working, Journal of Materials Processing Technology, 103 (1), 2000, 95-101.

[43] A. Povrzanović, Uvjet tečenja, FSB, Zagreb, 1994.

[44] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof, Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2002.

[45] V. Ivušić, Tribologija, FSB, Zagreb, 1998.

[46] C. Chatfield, Statistics for technology, Penguin Books, Baltimore, 1970.

[47] Design-Expert 6 User's Guide, Stat-Ease Inc., Minneapolis, 2008.

[48] B. Petz, Osnovne statističke metode za nematematičare, SNL, Zagreb, 1985.

[49] Grupa autora, "MSC.Marc Volume A: Theory and User Information," 2005.

[50] Grupa autora, "MSC.Marc Volume B: Element Library," 2005.

ŽIVOTOPIS

Zdenka Keran rođena je 13. lipnja 1977. godine u Zagrebu gdje je završila osnovnu školu i V gimnaziju. Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu upisuje 1995. godine. Diplomirala je 18. svibnja 2000. godine završivši program Proizvodnog smjera sveučilišnog dodiplomskog studija. Za uspjeh tijekom studija nagrađena je Medaljom Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Od listopada 2000. godine zaposlena je na Katedri za oblikovanje deformiranjem Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu kao znanstveni novak i asistent. Istovremeno pohađa poslijediplomski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, smjer Strojarske tehnologije. Od svibnja 2003. godine voditelj je Laboratorija za oblikovanje deformiranjem. Angažirana je u izvođenju nastave iz 15 kolegija te u istraživanju u okviru znanstvenog projekta CAM tehnologije i modeliranje u oblikovanju deformiranjem i mikrooblikovanju čiji je voditelj prof. dr. sc. Miljenko Math. Autorica je i koautorica 19 radova u znanstvenim časopisima te međunarodnim i domaćim znanstvenim skupovima. Govori i služi se engleskim jezikom. Udata je i majka dvoje djece.

BIOGRAPHY

Zdenka Keran was born on June 13th 1977 in Zagreb where she attended the elementary school, followed by „V gymnasium“. She enrolled the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb in 1995. She graduated on May 18th 2000 after she had comleted the programme of Production engineering. For the outstanding academic achievement she was rewarded with medal of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. Since October 2000 she has been working as a junior researcher at the Chair of Metal Forming, Faculty of Mechanical Engineering, University of Zagreb. She has attended postgraduate studies at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture majoring in Engineering Technology. Since May 2003 she has been a chief of Metal Forming Laboratory at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. She has been involved in teaching 15 undergraduate and graduate courses and is currently working on a scientific project „CAM Technologies and Modelling in Metal Forming and Microforming“ lead by prof.dr.sc. Miljenko Math. She has published 19 papers in scientific journals and proceedings of international and Croatian scientific conferences. She speaks English. She is married and mother of two children.