

**UNIVERZITET CRNE GORE
MAŠINSKI FAKULTET**

Kandidat:
Mr Janjić Mileta, dipl. inž. maš.

**ISTRAŽIVANJE NAPONSKO DEFORMACIONIH PARAMETARA
U PROCESIMA ZAPREMINSKOG DEFORMISANJA**

- Doktorska disertacija -

Mentor:
Prof. dr Domazetović Vuko, dipl. inž. maš.

Podgorica, 2005.

id-3329293



№ IV 801

Инв. бр. 23300

Izložena materija u ovom radu je rezultat moga višegodišnjeg rada u oblasti zapreminskog deformisanja. Eksperimentalna istraživanja su sprovedena na Mašinskom fakultetu u Podgorici.

Veliku zahvalnost dugujem prof. dr Vuku Domazetoviću, mom mentoru, na vođenju i svestranoj pomoći u toku svih faza izrade ovog rada.

Zahvaljujem se prof. dr Milanu Vukčeviću na konsultacijama i sugestijama prilikom izrade rada.

Zahvaljujem se rukovodstvu Mašinskog fakulteta u Podgorici na čelu sa dekanom dr Sretenom Savićevićem, kao i kolegama iz Centra za kvalitet, na razumijevanju i podršci.

Obimna eksperimentalna istraživanja nebi mogla biti realizovana bez pomoći kolega iz: Kombinata aluminijuma Podgorica, Metalca iz Nikšića, Instituta za crnu metalurgiju iz Nikšića, Željezare Nikšić i Laboratorije Građevinskog fakulteta u Podgorici. Oni su dali svoj doprinos u materijalu za ispitivanje i alate, izradi alata i mjernoj opremi, pa im se ovom prilikom srdačno zahvaljujem.

Zahvaljujem se dr Vesni Mandić, na pomoći oko prikupljanja literature i softvera.

Zahvalnost punu ljubavi i topline dugujem svojoj porodici: supruzi Radi, sinovima Marku i Dušanu i majci Rosi, što su mi davali podršku i imali razumijevanja za moj rad.

Godanjen

Mileta Janjić

**UNIVERZITET CRNE GORE
MAŠINSKI FAKULTET**

Ključna dokumentaciona informacija

<i>Redni broj (RBR):</i>	
<i>Identifikacioni broj (IBR):</i>	
<i>Tip dokumentacije (TD):</i>	Tekstualni štampani materijal
<i>Tip zapisa (TZ):</i>	Doktorska disertacija
<i>Vrsta rada (VR):</i>	Mr Janjić Mileta, dipl. inž. maš.
<i>Autor (AU):</i>	Prof. dr Domazetović Vuko, dipl. inž. maš.
<i>Mentor/komentor (MN):</i>	Istraživanje naponsko deformacionih parametara u procesima zapreminskog deformisanja
<i>Naslov rada (NR):</i>	Srpski
<i>Jezik publikacije (JP):</i>	Srpski i engleski
<i>Jezik izvoda (JI):</i>	Srbija i Crna Gora
<i>Zemlja publikovanja (ZP):</i>	Crna Gora
<i>Uže geografsko područje (UGP):</i>	2005.
<i>Godina izdavanja (GO):</i>	Reprint autora
<i>Izdavač (IZ):</i>	Kosmajnska bb, 81000 Podgorica
<i>Mjesto i adresa izdavača (MA):</i>	(Br. poglavlja/strana/lit. citata/tabela/slika/priloga)
<i>Fizički opis rada (FO):</i>	(9/249/149/84/184/6)
<i>Naučna oblast (NO):</i>	Mašinstvo
<i>Naučna disciplina (ND):</i>	Obrada metala deformisanjem
<i>Predmetna odrednica/ključne riječi (PO):</i>	Zapreminska obrada u otvorenim kalupima, deformacija, brzina deformacije, napon, pomjeranje, brzina pomjeranja, numerička simulacija, diskretizacija, visioplastičnost
<i>UDK</i>	
<i>Čuva se u (ČU):</i>	Univerzitetska biblioteka
<i>Važna napomena (VN):</i>	Cetinjski put bb, 81000 Podgorica
<i>Izvod (IA):</i>	Nema

Disertacija obuhvata analizu naponsko deformacionih parametara procesa deformisanja u otvorenim kalupima osnosimetričnih obradaka. Analiza obuhvata određivanje promjene svih komponenata deformacija, brzina deformacija i napona u meridijalnom presjeku obradka, na osnovu određene promjene pomjeranja tačaka presjeka. U tu svrhu izvedena su obimna eksperimentalna istraživanja, uz korišćenje poznatih i priznatih naučnih metoda i razvoja novih. Takođe su izvršene numeričke simulacije pomoću DEFORM softverskog paketa, kao jednog od paketa za metod konačnih elemenata.

Eksperimentalna istraživanja izvršena su korišćenjem realnog materijala - legure aluminijuma AlMgSi0,5 domaće proizvodnje, za usvojenu klasu stepenastih osnosimetričnih djelova. Ispitivanje se vrši u Laboratoriji Instituta Mašinskog fakulteta u Podgorici, gdje su ostali uslovi istraživanja, u skladu sa objektivnim mogućnostima, podešeni tako da su što približniji realnim uslovima koji vladaju u proizvodnji. Ispitivanje se vrši na temperaturama tople obrade u intervalu $t=(420\div 460)$ [°C], pri deformisanju na presi sa konstantnom brzinom deformisanja: $v=2$ [mm/s] i podmazivanjem grafitnom mašću.

Kao ulazni parametri posmatraju se: osnovni geometrijski parametri kalupa i priprema (definisani u obliku odnosa dimenzija kalupa i osnovnog prečnika kalupa, radi mogućnosti generalizovanja dobijenih rezultata) i termomehanički parametri (temperatura, stepen deformacije, koeficijent trenja, napon tečenja).

Eksperiment je organizovan saglasno višefaktornom ortogonalnom planu sa variranjem faktora na dva nivoa varijacije i ponavljanjem u centralnoj tački plana. Za izvođenje eksperimentalnih istraživanja razvijeni su i izrađeni odgovarajući alati za pripremu materijala procesom istosmjernog istiskivanja, slobodno sabijanje i deformisanje u otvorenim kalupima. Kalupi predstavljaju kombinaciju pločastih segmenata odgovarajućih dimenzija i kreću se u cjevastoj vodi, koja istovremeno služi kao komora za održanje izoternosti procesa.

U cilju određivanja pomjeranja tačaka meridijalnog presjeka obradka kao osnove za određivanje naponsko deformacionih parametara, razvijeni su segmentni pripremi od žljebastih pločica. Kod ovakvih priprema, odgovarajućom obradom koja se sastoji od skidanja jedne polovine obradka do ose simetrije, finog poliranja i nagrizanja 10% rastvorom NaOH, golim okom se uočava jasno izražena mreža kontura žljebastih pločica, pogodna za digitalizaciju i dalju računarsku obrdu. Metod je nazvan metodom fizičke diskretizacije, s obzirom da su u pitanju fizički diskretizovani pripremi.

Najvažniji ulazni faktor za određivanje naponskih komponenata i u numeričkim simulacijama i fizičkom modeliranju jeste napon tečenja, pa je izvršeno određivanje krivih ojačavanja korišćenjem više različitih metoda za konkretne uslove istraživanja. Regresionom analizom krivih ojačavanja dobijeni su visokokorelativni modeli oblika stepene funkcije, kao i ekvivalentne krive ojačavanja, koje predstavljaju srednje vrijednosti krivih dobijenih različitim metodima. Analiza dobijenih krivih ojačavanja i njihovih modela, urađena je na osnovu upoređenja eksperimentalno dobijene deformacione sile i sila dobijenih DEFORM simulacijom za različite krive ojačavanja. Kako je drugi važan ulazni faktor kontakno trenje, izvršeno je određivanje koeficijenta/faktora trenja za konkretne uslove istraživanja. Korišćena je eksperimentalna metoda sabijanja prstena (*Ring Test*) i više kalibracionih dijagrama po raznim autorima. Dobijeni su i kalibracioni dijagrami DEFORM simulacijom i izvršena je analiza svih rezultata. Kao materijal za ispitivanje, pored osnovnog materijala - legure aluminijuma, korišćeno je i olovo kao materijal koji dobro modelira tečenje aluminijuma u toplom stanju, što je potvrđeno analizom dobijenih rezultata.

Polazna osnova za analizu je dobijena digitalizovana slika meridijalnog presjeka sa mrežom deformisanih kontura žljebastih pločica. Parametri deformacija se dobijaju na osnovu pomjeranja čvornih tačaka mreže. Kinematski parametri, zbog nestacionarnosti procesa, određuju se na osnovu brzina pomjeranja u posmatranom vremenskom intervalu, pa je neophodno odrediti pomjeranja na početku intervala. Naponski parametri su određeni metodom visioplastičnosti. Takođe su dobijeni svi naponsko deformacioni parametri numeričkom DEFORM simulacijom.

Analizom i poređenjem svih naponsko deformacionih parametara, dobijenih metodom fizičke diskretizacije i DEFORM simulacijom, dobijen je veliki broj zaključaka koji se odnose na distribuciju parametara u meridijalnoj ravni obradka. Detaljnim poznavanjem svih parametara procesa zapreminskog deformisanja stvaraju se mogućnosti odgovora na sve strožije zahtjeve u pogledu kvaliteta poroizvoda, postojanosti alata i iskorišćenja proizvodnih resursa.

Datum prihvatanja teme (DP):

Datum odbrane (DO):

Komisija (KO):

1. Prof. dr Predrag Popović
Red. prof. u penziji Univerziteta u Nišu
2. Prof. dr Miroslav Plančak
Redovni prof. Univerziteta u Novom Sadu
3. Prof. dr Milan Vukčević
Red. prof. Univerziteta Crne Gore
4. Dr Vesna Mandić
Docent Univerziteta u Kragujevcu
5. Prof. dr Vuko Domazetović, mentor
Red. prof. u penziji Univerziteta Crne Gore

**UNIVERSITY OF MONTENEGRO
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**

Key-words Documentation

<i>Accession number (ANO):</i>	
<i>Identification number (INO):</i>	
<i>Document type (DT):</i>	Textual printed article
<i>Type of record (TR):</i>	Ph.D. thesis
<i>Contents code (CC):</i>	Janjić Mileta, M.Sc.
<i>Author (AU):</i>	Prof. Domazetović Vuko, Ph.D.
<i>Mentor/comentor (MN):</i>	Stress Deformation Parameter Investigation in the Processes of the Bulk Metal Forming
<i>Title (TI):</i>	Serbian
<i>Language of text (LT):</i>	Serbian and English
<i>Language of abstract (LA):</i>	Serbia and Montenegro
<i>Country of publication (CP):</i>	Montenegro
<i>Locality of publication (LP):</i>	2005.
<i>Publication year (PY):</i>	Author's reprint
<i>Publisher (PU):</i>	Kosmajaska bb, 81000 Podgorica
<i>Publisher's place (PP):</i>	(Chapters/pages/references/tables/pictures/addit. lists) (9/249/149/84/184/6)
<i>Physical description (PD):</i>	Mechanical engineering
<i>Scientific field (SF):</i>	Metal forming
<i>Scientific discipline (SD):</i>	Bulk Metal Forming in Open Die, Strain, Strain Rate, Stress, Displacement, Velocity of Displacement, Numerical Simulacion, Discretization, Visioplascity
<i>Subject/Key words (SKW):</i>	
<i>UC</i>	
<i>Holding data (HD):</i>	Universty's Library Cetinjski put bb, 81000 Podgorica
<i>Note (N):</i>	None
<i>Abstract (AB):</i>	

The paper comprises an analysis of the stress deformation parameter processes in open die of axial-symmetrical workpieces. The analysis includes a determination of the change in all strain components, strain rate and stress in meridial cross-section of a workpiece, based on a certain change of the cross-section point displacement. To this purpose detailed experiments have been carried out , using known and acknowledged scientific methods and developing software package, as one of those for the method of finite elements, have also been carried out.

Experimental investigations were carried out by using real material-aluminum alloys AlMgSi 0.5 of home production, for the accepted cllas of step down axial-symmetrical pieces. The investigation is performed in the laboratory of the Institute of the Faculty of Mechanical Engineering in Podgorica, where other investigation conditions, in accordance with objective possibilities, are adapted in a way to be as much more approximate to real conditions present in production. The investigation is done at the temperatures of thermal for forming within interval of $t=(420\div 460)$ [°C], at deformation on the pres at a constant strain rate: $v=2$ [mm/s], and by graphite grease lubrication.

Input parameters observed are: basic die and preparation piece geometrical parameters (defined in the form of relations of the die and basic die diameter, in order to generalize the results obtained) and parameters (temperature, strain degree, friction coefficient, stress yield).

The experiment is organized in accordance with a modern multi-factor orthogonal plan

with varying factors on two variation levels and by repeating in the central plan point. For performing experimental investigations there were developed and made corresponding tools to prepare material by the process of one-direction extrusion, free compression and deformation in open dies. The dies represent a combination of plate segments of corresponding dimensions and they move in a tube guide, serving at the same time as a chamber for maintaining process isothermity.

To determine point displacement of the workpiece meridial cross-section as a base for stress-strain parameter determination, there were developed segmental preparation pieces made of groove plates. With these pieces, by an adequate forming consisting of cutting a half of a workpiece to its symmetry axis, fine polishing and biting by 10% NaOH solution, it is possible to notice a clearly expressed network of the groove plate contours, suitable for digitalization and further computerization.

This most important factor for determining stress components both in numerical simulations and physical modelling is stress yield, thus a determination of strengthening curves using several different methods for concrete investigation conditions was made. By a regression analysis of the strengthening curves there have been obtained highly correlative step function form models, as well as equivalent strengthening curves, representing mean values of the curves obtained by various methods. The analysis of the obtained strengthening curves and their models was done on the base of comparing an experimentally obtained strain force and forced achieved by DEFORM simulation for various strengthening curves. As the second important input factor is contact friction, there has been determined a friction coefficient/factor for the concrete investigation conditions. There was used an experimental Ring Test and several caliber diagrams by various authors. There have been obtained caliber diagrams by DEFORM simulation and all the results have been analyzed. As an investigation material, apart from the basic one-aluminium alloy, suitable for a good modelling of hot aluminium yield, this being proved by analyzing the results obtained.

A starting base for the analysis is an obtained digitalized image of the meridail cross - section with the net of the deformed groove plate contours. Strain parameters are obtained on the base of displacing nod net points. Kinematics parameters, as the process is not stationary, are determined on the base of displacement velocity in the observed time interval, so it is necessary to determine a displacement at the beginning of an interval. Stress parameters have been determined by the method visioplasticity. There have also been obtained all stress and strain parameters by the numerical DEFORM simulation.

By analyzing and comparing all stress and strain parameters, obtained by the method of physical discretization and DEFORM simulation, there has been achieved a great number of conclusions referring to parameter distribution in meridial workpiece plane. By a detailed knowledge of all the parameters of the bulk metal forming process, there have been made possibilities to meet more strict demands as for product quality, tool stability and production resource utilization.

Accepted by Scientific Board on June 2005.

(ASB):

Defended on (DO):

Thesis Defend Board (TDB):

1. Ph.D. Predrag Popović
Retired Prof. of the Univerisy of Niš
2. Ph.D. Miroslav Plančak
Prof. of the University of Novi Sad
3. Ph.D. Milan Vukčević
Prof. of the University of Montenegro
4. Ph.D. Vesna Mandić
Ass. Prof. of the University of Kragujevac
5. Ph.D. Vuko Domazetović
Retired Prof. of the Univerisy of Montenegro

Sadržaj

Spisak korišćenih oznaka	XIII
1. UVOD.....	1
1.1. Ciljevi istraživanja.....	2
2. PREGLED LITERATURE.....	5
3. TEORIJSKE OSNOVE.....	11
3.1. Naponi	11
3.2. Deformacije	13
3.3. Brzine deformacija	15
3.4. Teorija plastičnog tečenja.....	16
3.5. Metodi rešavanja naponsko deformacionog stanja.....	17
3.5.1. Metod visioplastičnosti.....	18
3.5.1.1. Određivanje kinematskog polja po zapremini obradka	19
3.5.1.2. Određivanje komponenti brzine deformacije	20
3.5.1.3. Određivanje komponenti napona.....	20
3.6. Kontaktno trenje	21
3.6.1. Metodi za određivanje koeficijenta/faktora trenja.....	22
3.7. Specifični deformacioni otpor	24
3.7.1. Metod izražene zone deformacije (MIZOD)	24
3.7.2. Metod sabijanja hidrodinamičkim trenjem (MSHT)	26
3.7.3. Šofmanov metod (ŠM)	27
3.7.4. Uprošćeni metod (UM).....	28
3.7.5. Metod jednoosnog zatezanja (MJZ)	30
3.8. Metod konačnih elemenata (MKE)	31
3.9. Numerička simulacija.....	33
3.9.1. DEFORM softverski paket	35
3.9.2. DEFORM-2D v. 7.20 sistem	36
4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA.....	39
4.1. Definicija eksperimenta.....	39
4.2. Plan eksperimenta.....	40
4.2.1. Matrica plana eksperimenta.....	40
4.2.2. Ulazni faktori	40
4.3. Eksperimentalna oprema	42
4.4. Mjerna oprema.....	43
4.4.1. Davači sile i hoda prese	44
4.4.2. Baždarenje mjerne opreme	44
4.5. Alati za obradu deformisanjem	45
4.5.1. Alati za istosmjerno istiskivanje punih profila	45
4.5.2. Alati za deformisanje u otvorenim kalupima.....	45
4.5.2.1. Segmentni kalupi	46
4.5.3. Alati za slobodno sabijanje.....	47

4.6.	Eksperimentalni materijal i njegova priprema	47
4.6.1.	Kompaktni pripremljci	48
4.6.2.	Segmentni pripremljci.	49
4.6.2.1.	Razvoj segmentnih pripremljaka	49
4.6.2.2.	Izrada segmentnih pripremljaka od žljebastih pločica	50
4.7.	Realizacija eksperimenta	52
4.7.1.	Mjerenje deformacione sile tokom procesa deformisanja	52
4.7.2.	Priprema obradaka za određivanje naponsko deformisanog stanja	53
5.	ODREĐIVANJE KONTAKTNOG TRENJA	57
5.1.	Sabijanje prstena ("Ring Test")	57
5.2.	Numerička simulacija sabijanja prstena	64
5.3.	Određivanje koeficijenta/faktora trenja	72
5.4.	Analiza rezultata određivanja koeficijenta/faktora trenja	73
6.	ODREĐIVANJE KRIVIH OJAČAVANJA (KO)	77
6.1.	Određivanje KO metodom izražene zone deformacije (MIZOD)	77
6.2.	Određivanje KO metodom sabijanja hidrodinamičkim trenjem (MSHT)	78
6.3.	Određivanje KO Šofmanovim metodom (ŠM)	79
6.4.	Određivanje KO uprošćenim metodom (UM)	81
6.5.	Određivanje KO metodom jednoosnog zatezanja (MJZ)	82
6.6.	Analiza rezultata određivanja krivih ojačavanja	84
6.7.	Regresiona analiza krivih ojačavanja	86
6.8.	Kritički osvrt na korišćene metode određivanja krivih ojačavanja	89
7.	ZAPREMINSKO DEFORMISANJE U OTVORENIM KALUPIMA	95
7.1.	Metod fizičke diskretizacije (MFD)	95
7.1.1.	Određivanje deformacija	95
7.1.2.	Određivanje brzina deformacija	111
7.1.3.	Određivanje napona - metod visioplastičnosti	123
7.2.	Numerička simulacija (MKE)	129
7.3.	Regresiona analiza	134
8.	ANALIZA I POREĐENJE REZULTATA ZAPREMINSKOG DEFORMISANJA U OTVORENIM KALUPIMA	137
8.1.	Analiza deformacija	137
8.1.1.	Analiza deformacija dobijenih MFD	137
8.1.2.	Analiza deformacija dobijenih DEFORM simulacijom	140
8.1.3.	Poređenje deformacija	142
8.2.	Analiza brzina deformacija	149
8.2.1.	Analiza brzina deformacija dobijenih MFD	149
8.2.2.	Analiza brzina deformacija dobijenih DEFORM simulacijom	150
8.2.3.	Poređenje brzina deformacija	154
8.3.	Analiza napona	160
8.3.1.	Analiza napona dobijenih MFD	160
8.3.2.	Analiza napona dobijenih DEFORM simulacijom	162
8.3.3.	Poređenje napona	165
8.4.	Analiza deformacionih sila	172
8.5.	Analiza naponsko deformacionih parametara dobijenih modeliranjem	174

9. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA	175
LITERATURA	183
Spisak slika	191
Spisak tabela	199
PRILOZI.....	203
P.1. Skenirani meridijalni presjeci obradaka	203
P.2. Deformacione sile.....	212
P.3. Karakteristični računarski programi.....	218
P.4. Deformisane mreže konačnih elemenata.....	230
P.5. Parametri modela efektivne deformacije u karakterističnim tačkama presjeka	233
P.6. Karakteristične fotografije	248

Spisak korišćenih oznaka

σ	[dan/mm ²]	Normalni napon
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	[dan/mm ²]	Normalne komponente napona u Dekartovom koordinatnom sistemu
$\sigma_r, \sigma_y, \sigma_\theta$	[dan/mm ²]	Normalne komponente napona u cilindričnom koordinatnom sistemu
r, z	[mm]	Koordinate u cilindričnom koordinatnom sistemu
$\tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$	[dan/mm ²]	Smičuće komponente napona u Dekartovom koordinatnom sistemu
$\tau_{rz}, \tau_{\theta z}, \tau_{r\theta}$	[dan/mm ²]	Smičuće komponente napona u cilindričnom koordinatnom sistemu
F_x, F_y, F_z	[kN]	Sile u pravcu osa koordinatnog sistema
M_x, M_y, M_z	[kNm]	Momenti u pravcu osa Dekartovog koordinatnog sistema
T_σ		Tenzor napona
σ_e	[dan/mm ²]	Efektivni napon
D_σ		Devijator tenzora napona
σ_{sr}	[dan/mm ²]	Srednji normalni napon
u_x, u_y, u_z	[mm]	Pomjeranja u pravcu osa Dekartovog koordinatnog sistema
T_ϵ		Tenzor konačne deformacije
e_x, e_y, e_z		Normalne komponente konačnih deformacija u Dekartovom koordinatnom sistemu
e_{xy}, e_{yz}, e_{xz}		Smičuće komponente konačnih deformacija u Dekartovom koordinatnom sistemu
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$		Normalne komponente deformacija u Dekartovom koordinatnom sistemu
$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$		Smičuće komponente deformacija u Dekartovom koordinatnom sistemu
u_r, u_θ, u_z	[mm]	Pomjeranja u pravcu osa cilindričnog koordinatnog sistema
$\epsilon_r, \epsilon_\theta, \epsilon_z$		Normalne komponente malih deformacije u cilindričnom koordinatnom sistemu
$\gamma_{r\theta}, \gamma_{\theta z}, \gamma_{rz}$		Smičuće komponente konačnih deformacija u cilindričnom koordinatnom sistemu
T_ϵ		Tenzor deformacije
ϵ_e		Efektivna deformacija
v_x, v_y, v_z	[mm/s]	Brzine pomjeranja u pravcu osa Dekartovog koordinatnog sistema
$\dot{\epsilon}_x, \dot{\epsilon}_y, \dot{\epsilon}_z$	[s ⁻¹]	Normalne komponente brzina deformacija u Dekartovom koordinatnom sistemu
$\dot{\gamma}_x, \dot{\gamma}_y, \dot{\gamma}_z$	[s ⁻¹]	Smičuće komponente brzina deformacija u Dekartovom koordinatnom sistemu
v_r, v_θ, v_z	[mm/s]	Brzine pomjeranja u pravcu osa cilindričnog koordinatnog sistema
$\dot{\epsilon}_r, \dot{\epsilon}_\theta, \dot{\epsilon}_z$	[s ⁻¹]	Normalne komponente brzina deformacija u cilindričnom koordinatnom sistemu
$\dot{\gamma}_{r\theta}, \dot{\gamma}_{\theta z}, \dot{\gamma}_{rz}$	[s ⁻¹]	Smičuće komponente brzina deformacija u cilindričnom koordinatnom sistemu
$T_\dot{\epsilon}$		Tenzor brzine deformacije
$\dot{\epsilon}_e$	[s ⁻¹]	Efektivna brzina deformacija
$I_1(T_\epsilon)$		Prva invarijanta tenzora deformacije
D_{de}		Devijator tenzora priraštaja deformacije

D_t		Devijator tenzora brzine deformacije
λ'		Koeficijent proporcionalnosti u jednačinama Levy-Mises-a
C	[dan/mm ²]	Integraciona konstanta
τ	[dan/mm ²]	Tangencijalni kontaktni napon
p	[dan/mm ²]	Normalni kontaktni napon
μ		Koeficijent trenja
m		Faktor trenja
f		Faktor trenja po adhezionoj teoriji
α		Odnos realne i proračunate površine kontakta
D_0, d_0, h_0	[mm]	Geometrijski parametri prstena prije deformisanja
d, h	[mm]	Geometrijski parametri obradka u toku procesa deformisanja
ε_h	[%]	Stepen deformacije visine prstena
ε_d	[%]	Stepen deformacije unutrašnjeg prečnika prstena
$\phi D_0, \phi d_0, H_0, h_0, R, a$	[mm]	Geometrijski parametri priprema za MIZOD
A	[mm ²]	Površina poprečnog presjeka obradka
Δs	[mm]	Veličina sabijanja cilindričnog dijela obradka kod MIZOD
k	[dan/mm ²]	Specifični deformacioni otpor
φ		Logaritamski stepen deformacije
$\phi d_0, h_0, u, t$	[mm]	Geometrijski parametri priprema za MSHT
F	[kN]	Deformaciona sila
p	[dan/mm ²]	Radni pritisak
ε		Relativni stepen deformacije
Φ	[°]	Ugaona komponenta elementarnog djelica kod UM
a		Maksimalni radijus obradka kod UM
K		Popravni koeficijent kod UM
$l_0, l_v, L, \phi d_0, h, R, \phi D$	[mm]	Geometrijski parametri eprunete za ispitivanje zatezanjem
T	[K]	Apsolutna temperatura
t	[°C]	Temperatura
k_0	[dan/mm ²]	Početni napon tečenja
c		Konstanta materijala
n		eksponent deformacije
m		eksponent brzine deformacije
A, α		Konstante napona tečenja tipa 1
ΔH	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right]$	Aktivaciona energija
R	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$	Univerzalna gasna konstanta
Y		Inicijalni napon tečenja kod linearnog ojačavanja
A		Atomski sadržaj kod linearnog ojačavanja
H		Konstanta linearnog deformacionog ojačavanja
v	[mm/s]	Brzina deformisanja
N		Broj tačaka eksperimentalnog plana
n_0		Broj ponavljanja u centralnoj tački plana eksperimenta
X_i		Ulazni faktori u prirodnim koordinatama
X_{di}, X_{0i}, X_{gi}		Nivoi varijacije faktora: donji, osnovni i gornji nivo
x_i		Ulazni faktori u kodiranim koordinatama
w_i		Intervali varijacije ulaznih faktora
H_0	[mm]	Visina donjeg kalupa
H_1	[mm]	Visina prvog nivoa gornjeg kalupa

H_2		Visina drugog nivoa gornjeg kalupa
D	[mm]	Osnovni prečnik kalupa
D_1	[mm]	Prečnik drugog nivoa gornjeg kalupa
d_v, h_v	[mm]	prečnik i visina vijenca obradka
d_0, h_0	[mm]	prečnik i visina pripremka
U_d	[V]	Promjena napona davača usled deformacije mjernih traka
U_c	[V]	Napon napajanja davača
n		Broj aktivnih mjernih traka u mostu
E	[dan/mm ²]	Moduo elastičnosti
V_{g2}	[mm ³]	Zapremina drugog nivoa gornjeg kalupa
V_{g1}	[mm ³]	Zapremina prvog nivoa gornjeg kalupa
V_v	[mm ³]	Zapremina vijenca obradka
V_d	[mm ³]	Zapremina donjeg kalupa
β	[°]	Kovački nagibi kalupa
p_0, \dots, p_{10}		Geometrijski parametri žljebastih pločica
NSTEP		Broj koraka numeričke DEFORM simulacije
STPINC		Broj koraka između periodičnog memorisanja u bazi podataka
PDIE		Broj glavnog kalupa
DSMAX	[mm]	Pomjeranje po koraku
SMAX	[mm]	Maksimalno pomjeranje glavnog kalupa
X, Y, R	[mm]	Koordinate tačaka i radijusi kod definisanja geometrije u DEFORM-u
MGNELM		Broj konačnih elemenata mreže
FRCFAC		Faktor trenja
E(m)		Fukcija odstupanja eksperimentalnih vrijednosti stepena deformacije od DEFORM kalibracionih krivih
$\epsilon_d^{(E)}(\epsilon_h)$		Eksperimentalno dobijeni stepen promjene unutrašnjeg prečnika
$\epsilon_d^{(D(m))}(\epsilon_h)$		Stepen promjene unutrašnjeg prečnika dobijen DEFORM simulacijom
a_1, \dots, a_4		Parametri ekstrapolacionih funkcija kod ŠM
k_m	[dan/mm ²]	Maksimalni napon tečenja
ϕ_m		Logaritamski stepen deformacije koj odgovara maksimalnom naponu tečenja
c_0, c_1		Koficijenti modela stepene funkcije
R		Koeficijent korelacije
i_r		Broj radijalnih linija deformisane mreže
i_z		Broj tačaka aksijalnih linija deformisane mreže
j_r		Broj tačaka radijalnih linija deformisane mreže
j_z		Broj aksijalnih linija deformisane mreže
r_{bz}, z_{bz}	[mm]	Koordinate tačaka deformisanih aksijalnih linija na kraju procesa
r_{br}, z_{br}	[mm]	Koordinate tačaka deformisanih radijalnih linija na kraju procesa
r_{pb}, z_{pb}	[mm]	Koordinate čvornih tačaka deformisane mreže na kraju procesa
r_{p0}, z_{p0}	[mm]	Koordinate čvornih tačaka nedeformisane mreže
r, z	[mm]	Koordinate posmatranih tačaka meridijalnog presjeka obradka
$\phi_r, \phi_\theta, \phi_z$		Normalne komponente logaritamskih deformacija
ϕ_e		Efektivna logaritamska deformacija
r_{az}, z_{az}	[mm]	Koordinate tačaka deformisanih aksijalnih linija na početku posmatranog intervala
r_{ar}, z_{ar}	[mm]	Koordinate tačaka deformisanih radijalnih linija na početku posmatranog intervala

r_{pa}, z_{pa}	[mm]	Koordinate čvornih tačaka deformisane mreže na početku posmatranog intervala
Δt	[s]	Interval vremena
$\beta_1, \dots, \beta_{21}$		Parametri modela sa kvadratnom funkcijom odziva
$F_{mg}^{(MFD)}$	[kN]	Maksimalna deformaciona sila na gornjem kalupu dobijena MFD
$F_{md}^{(MFD)}$	[kN]	Maksimalna deformaciona sila na donjem kalupu dobijena MFD
$F_{msr}^{(MFD)}$	[kN]	Srednja maksimalna deformaciona sila dobijena MFD
$F_{nB}^{(E)}$	[kN]	Maksimalna deformaciona sila izmjerena eksperimentalno za B pripremljene
$F_{nC}^{(E)}$	[kN]	Maksimalna deformaciona sila izmjerena eksperimentalno za C pripremljene
$F_{mg}^{(D)}$	[kN]	Maksimalna deformaciona sila na gornjem kalupu dobijena DEFORM simulacijom
$F_{md}^{(D)}$	[kN]	Maksimalna deformaciona sila na donjem kalupu dobijena DEFORM simulacijom
$F_m^{(D)}$	[kN]	Maksimalna deformaciona sila dobijena DEFORM simulacijom

1. UVOD

Poizvodni uslovi u oblasti metaloprerađivačke industrije su izuzeno pooštreni poslednjih godina, u smislu dobijanja metalnih proizvoda sa minimalnim utrošakom materijala, energije i vremena proizvodnje. Na pomenute efekte utiču globalna kretanja u svjetskoj privredi koja se karakterišu, prije svega, energetsom krizom i krizom sirovina. Ovo je naročito izraženo u obradi metala deformisanjem, kao obradi koja se najviše primjenjuje.

U okviru obrade deformisanjem, zapreminsko deformisanje, a naročito zapreminsko deformisanje u otvorenim kalupima, se posebno izdvaja svojom složenošću. I pored napora velikog broja istraživača, može se reći da ne postoji definitivno prihvaćen metod, niti pak definitivna rešenja, što je, prije svega, uslovljeno činjenicom da je pri ovom vidu obrade materijala, posebno teško pomiriti dva kriterijuma: korektnost i jednostavnost rešenja. To znači da je područje ispitivanja geometrijskih i mehaničkih parametara veoma aktuelno i još nedovoljno istraženo. Složenost problematike je uslovlila neophodnost korišćenja međusobno povezanih pristupa: teorijskog, eksperimentalnog i numeričkog.

Osnovni razlog veoma široke upotrebe deformisanja u otvorenim kalupima jeste mogućnost dobijanja obradaka najrazličitijih oblika sa dobrim mehaničkim karakteristikama. To se postiže zahvaljujući povoljnom naponskom stanju unutar obradka, tokom procesa obrade, a naročito u završnoj fazi, gdje preovladavaju pritisne komponente napona. S druge strane, razvoj materijala i tehnologije izrade alata, mogućnost primjene na visokim temperaturama i brzinama deformisanja, samo su još neki od razloga široke zastupljenosti obrade deformisanjem u otvorenim kalupima.

Za uspješno i ekonomično projektovanje bilo kojeg tehnološkog postupka obrade deformisanjem, od velikog je značaja poznavanje podataka o otporu deformaciji, kontaktnom trenju, i ne samo osnovnih mehaničkih parametara procesa, kao što su deformaciona sila, rad i radni pritisak, nego i kompletnom naponsko deformacionom stanju. Prihvaćene osnovne teorijske postavke i brojna eksperimentalna istraživanja imaju vidnu neusaglašenost u konkretnim uslovima deformisanja, tako da se u većini stvarnih radnih uslova nameće potreba modeliranja bitnih parametara koji se javljaju tokom procesa, u funkciji relevantnih ulaznih faktora.

U klasičnim proizvodnim uslovima projektovanje tehnoloških postupaka obrade deformisanjem izvodi se uz primjenu inženjerskih metoda obrade deformisanjem i na bazi iskustva i intuicije eksperata, što je praćeno većim korekcijama alata i dugim vremenom projektovanja, uz velike troškove. U novije vrijeme, sa razvojem računarske opreme, došlo je do njene primjene u svim tehnologijama, pa i tehnologiji obrade deformisanjem. Zahvaljujući tome, sve više na popularnosti i praktičnoj primjeni dobijaju metode numeričkog modeliranja, a prije svega metoda konačnih elemenata - MKE (*Finite Element Method - FEM*). Ova metoda praktično se može koristiti samo uz računarsku podršku, zbog čega je razvijen određen broj softverskih paketa pomoću kojih se mogu vršiti numeričke simulacije procesa deformisanja.

Numeričkim simulacijama procesa deformisanja, pa samim tim i deformisanja u otvorenim kalupima, dobija se veliki broj promjena geometrijskih, naponsko deformacionih mehaničkih i termodinamičkih parametara tokom odvijanja procesa. Poznavanjem navedenih parametara moguće je vršiti optimizaciju tehnološkog postupka, određivanje konačnog oblika alata, sprečavanje defekata obradka i dobiti kompletnu vizuelizaciju procesa.

Pored svih mogućnosti numeričkih simulacija, postoje izvjesna ograničenja u njihovoj primjeni. Ova ograničenja se odnose, prije svega, na ulazne podatke od kojih zavisi tačnost rezultata simulacije. Zbog toga je nophodno vršiti eksperimentalnu verifikaciju dobijenih rezultata i poređenje sa rezultatima dobijenim drugim metodima.

1.1. CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Tehnologija zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima, s obzirom na njen naglašeni značaj, bila je predmet mnogih istraživanja. Istraživanja su uglavnom bila usmjerena na glavne faktore obrade: deformacionu silu, deformacioni rad i radni pritisak. Naponsko deformacioni parametri su proučavani u manjoj mjeri naročito kod osnosimetričnih obradaka, zbog karakteristika naponskog stanja koje se javlja u toku procesa deformisanja. Ovo se prije svega odnosi na istežuće obodne napone, pa je eksperimentalno određivanje vrijednosti napona otežano, jer ono podrazumijeva prethodno određivanje deformacionog i kinematskog stanja. Istraživanja su se, uglavnom, zadržavala na teorijskom nivou. U novije vrijeme su veoma česta numerička istraživanja, kao posledica razvoja softvera za numeričke simulacije.

Osnovni cilj istraživanja ovog rada je određivanje naponsko deformacionih parametara po zapremini obradka kod zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima osnosimetričnih obradaka i njihova analiza. Naponsko deformacioni parametri podrazumijevaju sve komponente tenzora napona, deformacija, a takode i brzina deformacija. Poznavanjem ovih parametara dobija se mogućnost određivanja svih drugih parametara procesa deformisanja. Drugim riječima, cilj istraživanja je bio fizičko modeliranje zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima, pri čemu se kao modelski, koristi realni materijal. Ostali uslovi deformisanja se postavljaju tako da što više odgovaraju realnim - proizvodnim uslovima.

Osnova za određivanje komponentata tenzora deformacije i komponentata tenzora brzine deformacije jeste poznavanje pomjeranja tačaka zapremine obradka. Kod osnosimetričnih obradaka dovoljno je poznavati pomjeranja tačaka meridijalnog presjeka, pa je u tom cilju bilo potrebno organizovati i izvršiti eksperimentalna istraživanja na odgovarajući način. U cilju određivanja vrijednosti pomjeranja tačaka potrebno je na odgovarajući način izraditi pripreme, tako da se njihovom obradom nakon procesa deformisanja, mogu odrediti pomjeranja tačaka.

Cilj rada je i numerička simulacija procesa zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima metodom konačnih elemenata, pomoću raspoloživog softverskog paketa i analiza dobijenih rezultata. Takođe, upoređenjem rezultata dobijenih fizičkim modeliranjem i numeričkom simulacijom vrši se njihova verifikacija i sagledava mogućnost primjenljivosti na realne procese zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima i na druge procese obrade deformiranjem.

Poseban dio istraživanja je imao za cilj određivanje glavnih ulaznih parametara u obradi deformiranjem koji imaju najviše uticaja na proces. I kod fizičkog modeliranja i kod numeričkih simulacija to je specifični deformacioni otpor ili napon tečenja, izražen preko krive ojačavanja, a kod numeričkih simulacije to je još i kontaktno trenje u vidu koeficijenta, odnosno faktora trenja.

Kod određivanja kontaktnog trenja postoji veći broj metoda od kojih se metod sabijanja prstena pokazao najboljim. Međutim, postoji više kalibracionih dijagrama po raznim autorima, za određivanje faktora/koeficijenta trenja ovim metodom, pa je potrebno odrediti njihove vrijednosti i napraviti analizu dobijenih rezultata. Kalibracioni dijagrami se mogu dobiti i numeričkom simulacijom za variranje vrijednosti faktora trenja, pa je cilj da se i na taj način dobijene vrijednosti uzmu u analizu.

Za određivanje krivih ojačavanja postoji više metoda, koji sa manjom ili većom tačnošću daju vrijednost napona tečenja. Cilj je bio da se izvrši izbor određenog broja poznatih metoda i dobiju krive ojačavanja, za koje će biti izvršena regresiona analiza. Svi dobijeni rezultati se

međusobno porede, a njihova verifikacija se vrši na osnovu poređenja deformacione sile, dobijene numeričkom simulacijom slobodnog sabijanja, sa eksperimentalno izmjerenim vrijednostima. Deformaciona sila predstavlja mjerodavni parametar procesa deformisanja, koji se može izmjeriti na relativno jednostavan način i sa visokom tačnošću.

Postavljeni ciljevi istraživanja podrazumijevaju sveobuhvatnu kritičku analizu većeg broja literaturnih izvora, pogotovo novijeg datuma. Na bazi odabrane literature, potrebno je izvršiti izbor metoda istraživanja za konkretne uslove, i/ili usavršiti i modifikovati postojeće metode. S obzirom da u dostupnoj literaturi nema rešenja pomoću kojih se dolazi do pomjeranja tačaka meridijalnog presjeka obradka kod zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima, kao osnove za naponsko deformacionu analizu, potrebno je razviti novi metod, u skladu sa postavljenim uslovima deformisanja.

Cilj ovakvog pristupa istraživanjima je da se da naučni doprinos u oblasti obrade zapreminskim deformisanjem u otvorenim kalupima, što bi išlo u prilog odgovora sve strožijim zahtjevima u pogledu kvaliteta poroizvoda, postojanosti alata i iskorišćenja proizvodnih resursa. Na taj način se daje doprinos široj primjeni ove tehnologije i stvara mogućnost primjene iste, ili slične (modifikovane) metodologije i u drugim oblastima obrade zapreminskim deformisanjem.

2. PREGLED LITERATURE

Zapreminskim deformisanje metala i legura bavi se veoma veliki broj istraživača, koji svoje radove, prezentiraju naučnoj i stručnoj javnosti u časopisima, monografijama, knjigama, na simpozijumima i slično. Iako se u ovom radu daje akcenat zapreminskom deformisanju u otvorenim kalupima, izvršiće se širi pregled literature, jer se mogu iskoristiti rezultati i iz drugih obrada zapreminskog deformisanja.

Kod zapreminske obrade u otvorenim kalupima od velikog je značaja poznavanje kontaktnog trenja, pa se ovim problemom bavi veći broj istraživača. Istraživanja kontaktnog trenja se najčešće vrše na procesu slobodnog sabijanja cilindra ili prstena, a rezultati mogu da se primijene i na ostale procese zapreminskog deformisanja. Za određivanje kontaktnih napona između materijala i alata koriste se različiti metodi. U radovima [12,112,144] korišćen je metod linija klizanja. Kalibracioni dijagrami, dobijeni po različitim metodama, korišćenjem različitih modela kontaktnog trenja dati su u radovima [23,70,71]. Za ove radove je zajedničko što se koristi jedinstveni eksperimentalni metod sabijanja prstena (*Ring Test*) sa odnosom dimenzija $D_0 \times d_0 \times h_0 = 6 \times 3 \times 2$ [mm].

U novijim radovima dominira korišćenje numeričkih simulacija za definisanje kontaktnih uslova kod zapreminskog deformisanja [18,19,59,75,84,88]. Pomoću različitih softverskih paketa za numeričke FEM simulacije, dobijeni su kalibracioni dijagrami, pomoću kojih se određuje faktor trenja. Analiziraju se rezultati dobijeni na ovaj način i daje im se prednost za korišćene u numeričkim simulacijama. U radu [117] se upoređuju različiti modeli trenja i rezultati dobijeni FEM simulacijama, korišćenjem tih modela.

Takođe se proučavaju različiti efekti na kontaktnim površinama obradka i alata, npr. u radovima [64,99] uticaj strukture kontaktne površine alata i sredstava za podmazivanje na otpor plastičnoj deformaciji, pri toploj obradi. Površinska čvrstoća alata se smanjuje pri povećanju temperature usled ponavljanja operacija, što dovodi do termalnog omekšavanja i smanjenja vijeka trajanja alata. Izvršena je i numerička FEM simulacija, a rezultati se upoređeni sa ekseperimentom. U radu [45] se modelira habanje kontaktnih površina alata sa obradkom u zonama klizanja i prijanjanja, a u radu [18] se daje teorijski doprinos numeričkom modeliranju kontakta i trenja u FEM simulacijama procesa deformisanja.

Teorijski doprinosi se daju stalnim unapređenjima formulacije metoda konačnih elemenata. U radovima [95,96] unapređenja formulacije FEM u obradi zapreminskog deformisanja odnose se na unapređenje algoritma, gdje se u prvom radu koristi tzv. *Split* algoritam, a drugi se zasniva na jednostavnim odnosima elastično plastičnih deformacija. Konstitutivna relacija se bazira na dekompoziciji brzina deformacija na elastične i plastične komponente, pri čemu se *Cauchy*-ev napon daje u odnosu na Total-Elastic-Incremental-Plastic (TEIP) deformacije. Pokazana je veća tačnost dobijenih rezultata u odnosu na rezultate dobijene drugim FEM formulacijama.

Najvažniji ulazni parametar u obradi deformisanjem jeste napon tečenja, pa su uvijek aktuelna istraživanja, u smislu razvoja novih i usavršavanja postojećih metoda za određivanje krivih ojačavanja. Postoji relativno veliki broj eksperimentalnih i eksperimentalno teorijskih metoda pomoću kojih se određuju krive ojačavanja, i one su date u knjigama iz obrade deformisanjem [82,87,126]. Pored određivanja krivih ojačavanja, značajni su radovi koji se bave analizom uticaja pojedinih parametara na napon tečenja, kao što su: stepen deformacije, brzina deformacije, temperatura, dinamička rekristalizaciona, deformaciono ojačavanje i omekšavanje.

Ovi uticaji ispituju se za različite metalne materijale: čelik i njegove legure, aluminijum i njegove legure, olovo i dr. [2,10,17,114,148].

U novije vrijeme javljaju se radovi koji se bave određivanjem krivih ojačavanja korišćenjem softverskih paketa za numeričke FEM simulacije [19,58,86,97,149]. Metod polazi od krive ojačavanja dobijene nekom od poznatih metoda, ili uzete iz literature i iterativnim postupkom, uz korekciju pomoću rezultata numeričkih simulacija, dolazi do krive ojačavanja.

Numeričke FEM simulacije služe i za verifikaciju napona tečenja i koeficijenta trenja. U radu [47] se daje metod dva priprema za određivanje krivih ojačavanja. Na osnovu validnog matematičkog modela, mogu se istovremeno procijeniti vrijednosti napona tečenja i koeficijenta trenja. Metod je verifikovan upoređenjem sa eksperimentalno dobijenim vrijednostima na više načina i ocijenjen je numeričkom FEM simulacijom sabijanja prstena. Metod daje dobre vrijednosti napona tečenja, dok su vrijednosti koeficijenta trenja relativno niske.

U posljednje vrijeme preovladavaju radovi koji se bave raznim aspektima numeričkih FEM simulacija. U radovima [13,84] se konstatuje da simulacije postaju glavni alati u problemima naprednih proizvodnih tehnologija obrade deformisanjem. Simulacije omogućavaju najbolje sagledavanje procesa deformisanja i daju najveći broj informacija. Međutim postoje ograničenja koja je potrebno prevazići. Ograničenja se, prije svega, odnose na tačnost ulaznih parametara. Dvodimenzionalne simulacije su otišle naprijed, dok kod 3D simulacija treba intenzivno raditi na povećanju brzine, unapređenja tehnika automatskog *remeshing*-a, razvoja korisničkog *interface*-a.

U radovima [122,107] analizira se uticaj ulaznih parametara na FEM simulacije deformisanja u otvorenim kalupima, pomoću konkretnih softverskih paketa i rezultati upoređuju sa rezultatima dobijenim numeričkim analizama. Kod hladne obrade je zastupljen manji broj ulaznih faktora, dok su kod tople obrade, pored geometrijskih i mhaničkih, prisutni i termodinamički parametri, koji imaju značajan uticaj. Uticaj termomehaničkih parametara na proces slobodnog sabijanja čelika u toplom stanju, takođe se proučava u radovima [76,77,78] i rezultati upoređuju sa eksperimentom.

U radu [7] se konstatuje postojanje velikog broja ulaznih parametara kod tople obrade i značajnost određivanja korektnih procesnih parametara na simulaciju obrade. Izvršena je simulacija preciznog kovanja (*Near-Net-Shape*) klipnjače. *Near-Net-Shape* tehnologija obrade deformisanjem je napredna tehnologija, kod koje se minimizira, ili čak potpuno eliminiše naknadna dorada izradka obradom rezanjem. Na taj način se postiže ušteda u materijalu i vremenu izrade gotovog komada. Radovi [112,121] koriste numeričke simulacije za opisivanje operacija preciznog kovanja. Eksperimentalno dobijeni podaci se statistički obrađuju i služe za verifikaciju analitičkih rešenja i kompjuterskih simulacija. Dobijeni rezultati su primjenjljivi u inženjerskoj praksi.

U radovima [15,40] su data poređenja rezulta numeričkih FEM simulacija i fizičkog modeliranja procesa obrade deformisanjem u otvorenim kalupima i naglašen njihov edukativni karakter. Ukazano je da se rezultati numeričkih simulacija ne mogu bezrezervno prihvatiti zbog neodređenosti ponašanja materijala koji se deformiše i triboloških uslova interakcije obradka i alata. Izvršena su fizička modeliranja metalnim materijalima i plastelinom i primijenjena na ocjenu validnosti rezultata FEM simulacije. Pokazano je da plastelin korektno modelira popunjavanje kalupa i daje mogućnost vizuelizacije tečenja. Na osnovu fizičkog modeliranja metalnim materijalima, kao što su legure aluminijuma i olovo, postiže se dobar izbor dimenzija priprema i geometrije kalupa. Defekti usled nepopunjavanja kalupa se mogu analizirati i eliminisati izmjenom geometrije kalupa [147].

Poseban značaj numeričkih FEM simulacija je u predviđanju i analizi defekata, zbog velikih troškova usled njihove pojave. Više radova bavi se ovim problemom. U radovima [9,125] dat je pregled i pojava defekata koji se javljaju u obradi zapreminskim deformisanjem, kao i njihovim uzrocima i načinima prevazilaženja. Kod tople obrade je čest slučaj nedovoljno i/ili

nepravilno popunjavanje gravure kalupa, gdje dolazi do previjanja i smicanja [8]. Defekti koji se najčešće javljaju su pukotine, naročito kod hladne obrade (*Chavron Defect* kod istosmjernog istiskivanja). U radovima [5,125,48] vrši se numerička FEM simulacija pojave Chavron-ovog defekata i rezultati se upoređuju sa fizičkim modeliranjem. Naglašava se neophodnost što tačnijeg određivanja ulaznih parametara, prije svih napona tečenja i faktora trenja, a takode i kritične vrijednosti oštećenja (Critical Damage Value - CDV), koja se dobija testom sabijanja cilindra i istezanja epruvete.

Na osnovu poznatog naponskog stanja obradka može se doći do podataka o obradivosti materijala. Pokazatelj obradivosti je granična linija u dijagramu efektivne deformacije u funkciji veličine koja definiše naponsko stanje, pri kojoj dolazi do pojave prvih pukotina. Više radova se bavi ovim problemom [92,102,127,128]. U radovima [89,114] se vrši određivanje obradivosti korišćenjem numeričkih FEM simulacijama pri upotrebi različitih formulacija kriterijuma duktilnog loma.

Obradivost materijala se određuje na osnovu poznatog naponsko deformacionog stanja stanja, čijim poznavanjem je moguće odrediti sve glavne faktore obrade. Zbog svojeg značaja postoji veći broj radova koji se bave određivanjem deformacionog stanja, koje je u oblasti elastičnosti praćeno velikim deformacijama. U radovima [24,108] za određivanja deformacionog stanja nanosi se mreža prije deformisanja i mjeri poslije deformisanja. Uzima se u obzir homogeni i nehomogeni model deformacija i daje analiza dobijenih rezultata. U prvom radu se analizira i razlika između kvadratne i kružne mreže, koja je pogodna za određivanje glavnih pravaca deformacija. U radu [90] se analizira kruto plastična FEM formulacija za simulacije procesa zapreminskog deformisanja metala, sa velikim deformacijama. Ukazano je na probleme i poteškoće koji trebaju biti prevaziđeni.

Kod određivanja naponsko stanja obradka pri zapreminskom deformisanju koriste se poznati metodi, obrađeni u radu [2]. Najviše se koristi metod visioplastičnosti, koji je naročito pogodan kod stacionarnih procesa ravanskog ili osnosimetričnog deformisanja, kakvi su proces istosmjernog istiskivanja [80,92,103,104,105], ili proces izvlačenja. Naponsko stanje obradka se dobija rešavanjem osnovne jednačine visioplastičnosti, do koje se dolazi na pomoću osnovnih relacija teorije plastičnosti i veza *Levy-Mises*-a napona i brzina deformacija. Osnovni problem predstavlja određivanje integracione konstante.

Metod može biti primijenjen i na nestacionarne procese [92], kakav je proces suprotnosmjernog istiskivanja, pri čemu se kinematsko komponente određuju na osnovu poznatog deformacionog stanja u dva bliska momenta deformisanja. Metod se može adaptirati i primijeniti na deformisanje u otvorenim kalupima.

U posljednjih deset godina sve više radova javlja se u vezi korišćenja numeričkih FEM simulacija u procesima CAD, CAM i CAE tehnika automatskog projektovanja tehnologija obradke zapreminskim deformisanjem [6,69]. Takođe se razvijaju i ekspert sistemi, gdje se baze podataka i baze znanja dobijaju empirijski i na osnovu FEM analiza [16,43].

Tim za obradu deformisanjem sa Katedre za proizvodno mašinstvo, Mašinskog fakulteta u Podgorici, se najvećim dijelom bavio zapreminskim deformisanjem, a posebno deformisanjem u otvorenim kalupima i slobodnim sabijanjem. U nastavku se daje pregled nekih od objavljenih radova.

U radu [131] se primjenom varijacione metode, na relativno jednostavan način, dobija analitički izraz za radni pritisak pri slobodnom sabijanju cilindričnih priprema, na osnovu koje se određuje koeficijent trenja u funkciji temperature, odnosa dimenzija priprema i logaritamskog stepena deformacije. U radovima [59,60,62] određivanje koeficijenta/faktora trenja se bazira na Ring Test metodi.

U radovima [130,138] specifični deformacioni otpor se određuje na osnovu više poznatih metoda i po razvijenoj metodi izražene zone deformacije i porede rezultati za slučaj legure aluminijuma. Metod se bazira na ispitivanju pritiskom uz postizanje linijskog naponskog stanja

pomoću oblika profila priprema. Metod je pokazao dobre rezultate. Rad [39] se odnosi na određivanje krivih ojačavanja uprošćenim metodom, koji se bazira na rešavanju odnosimetričnog naponsko deformacionog stanja obradka kod slobodnog sabijanja. Metod je pogodan uz korišćenje razvijenog informacionog mjernog sistema za mjerenje konture obradka. Krive ojačavanja su određivane i numeričkim FEM simulacijama [58,61].

Proces slobodnog sabijanja je istraživao sa različitih aspekata. U radovima [31,34,36] ispitivani su deformaciona sila i radni pritisak kod slobodnog sabijanja. Dobijene su teorijske i modelske vrijednosti i upoređene sa eksperimentalnim. U radovima [57,76,77,78] je izvršeno neizotermno slobodno sabijanje čeličnog cilindričnog priprema i numerička FEM simulacija i upoređeni su rezultati.

Naponsko deformaciona analiza kod deformisanja u otvorenim kalupima je vršena u radovima [30,32,33,35,63]. Analiza je vršena tako što su određivane glavne logaritamske deformacije na osnovu geometrijske diskretizacije obradka. Meridijalni presjek obradka se dijeli pravim linijama na elementarne djelove, sa odgovarajućim priraštajem radijusa. Na osnovu zakona konstantnosti zapremine određuju se svi geometrijski parametri elementarnih djelova u deformisanom i nedeformisanom stanju i na osnovu njihove promjene dolazi se do glavnih logaritamskih deformacija i napona. Nedostatak metoda je u tome što realna slika deformisanog presjeka ne odgovara pretpostavci na osnovu koje je napravljena diskretizacija, tj. prava vlakna paralelna osi cilindričnog priprema ne ostaju prava tokom deformisanja, već dolazi do njihove deformacije. Ovaj nedostatak se dijelom prevazilazi u radovima [29,54,55,62]. Modeliranje naponsko deformacionog stanja obradka pri deformisanju u otvorenim kalupima se vrši pomoću legure aluminijuma oznake 7049, koja ima svojstvo da hemijskom obradom presjeka poslije deformisanja pokaže linije tečenja. Na osnovu snimljene slike linija tečenja i zakona konstantnosti zapremine dolazi se do deformisanih, prethodno pravih linija, paralelnih osi priprema. Ove linije su posledica dobijanja šipki procesom istosmjernog istiskivanja. Na osnovu toga je moguće praviti dalju podjelu u pravcu ose obradka, ali se takođe određuju samo glavne deformacije. Pri tome se naglašava mogućnost daljeg usavršavanja metode preko određivanja pomjeranja tačaka presjeka u radijalnom i aksijalnom pravcu.

Na bazi razvijene metode geometrijske diskretizacije vršena je analiza naponsko deformacionog stanja i rezultati poređeni sa drugim metodima (UBET) i numeričkom FEM simulacijom u radovima [55,56,138]. Takođe je vršeno eksperimentalno i teorijsko određivanje deformacionih sila i radnih pritisaka pri zapreminskom deformisanju u otvorenim kalupima u radovima [28,37,38,62]. Značajni su radovi koji se bave određivanjem promjene slobodne konture obradka tokom odvijanja procesa deformisanja, na osnovu čega se stvara mogućnost naponsko deformacione analize obradka tokom čitavog procesa deformisanja. To je urađeno u radovima [27,28,53,139,141,142].

Od posebnog značaja su radovi [31,131,132,133,134,135,136] koji se odnose na primjenu numeričkih FEM simulacija procesa zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima. Oni su bili među prvim radovima u našoj zemlji iz oblasti primjene FEM simulacija u oblasti plastičnih deformacija. Radovi su urađeni uz pomoć nekomercijalnog softverskog paketa EPFEP3, koji je nastao na Univerzitetu u Birmingemu - UK. Tu su i noviji radovi dobijeni uz pomoć tog paketa [53,55,139], iz kojega je nastao komercijalni softverski paket EESY-FORM, koji je korišćen u radovima [56,140]. U radovima se vrše numeričke FEM simulacije zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima različitih oblika gravure, i upoređuju dobijeni rezultati, preko promjene slobodne konture, deformacione sile i deformacionog stanja.

U novijim radovima koji se odnose na numeričke FEM simulacije dominira softverski paket DEFORM koji je jedan od najboljih paketa za probleme deformisanja u oblasti plastičnosti [57,58,59,60,61,76,77,78]. Navedeni radovi se bave korišćenjem numeričkih FEM simulacija za određivanje i analizu faktora trenja, napona tečenja, deformacione sile i naponsko deformacionog stanja.

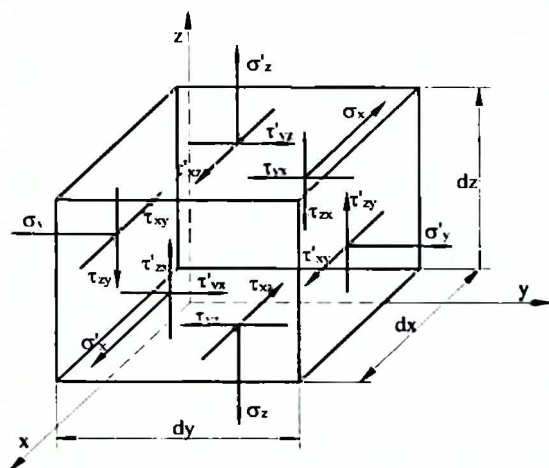
Izloženi pregled literature ima za cilj da da osvrt na istraživanja u oblasti zapreminskog deformisanja, na osnovu kojih se trasira put istraživanjima u ovom radu, koja se odnose na deformisanje u otvorenim kalupima. U najvećem broju radova, numeričke FEM simulacije su zastupljene u svim aspektima deformisanja. Zbog određenih ograničenja, prije svega tačnosti ulaznih podataka, neophodna je verifikacija dobijenih rezultata, upoređenjem sa drugim metodima i eksperimentalno dobijenim vrijednostima. Verifikacija se vrši, uglavnom, na nivou osnovnih parametara, dok u domenu naponsko deformacionih parametara je malo zastupljena, gdje postoji otvoreno široko polje istraživanja.

3. TEORIJSKE OSNOVE

3.1. NAPONI

Da bi se mogle postaviti diferencijalne jednačine ravnoteže, posmatra se elementarni paralelopiped stranica dx , dy i dz u pravouglom koordinatnom sistemu opterećen komponentama napona [81] (Slika 3.1.), pri čemu su komponente označene sa apostrofom (') na stranama sa priraštajem kordinata dx , dy , dz respektivno:

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_x &= \sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx & \tau'_{xy} &= \tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy & \tau'_{xz} &= \tau_{xz} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} dz \\ \tau'_{yx} &= \tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} dx & \sigma'_y &= \sigma_y + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} dy & \tau'_{yz} &= \tau_{yz} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} dz \\ \tau'_{zx} &= \tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} dx & \tau'_{zy} &= \tau_{zy} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} dy & \sigma'_z &= \sigma_z + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} dz \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$



Slika 3.1. Naponsko stanje elementarnog paralelopipeda

Ako se tijelo nalazi u statičkoj ravnoteži onda mora biti zadovoljeno ukupno šest uslova ravnoteže - tri uslova ravnoteže sila i tri uslova ravnoteže momenata:

$$\sum F_x = 0, \quad \sum F_y = 0, \quad \sum F_z = 0 \quad (3.2)$$

$$\sum M_x = 0, \quad \sum M_y = 0, \quad \sum M_z = 0 \quad (3.3)$$

Razvijajući prvu jednačinu ravnoteže sistema sila (3.2) i uzimajući da je komponenta sile u pravcu ose x jednaka proizvodu odgovarajuće komponente napona i površine stranice elementarnog paralelopipeda na kojoj djeluje, dobija se:

$$\begin{aligned} & \left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) dydz - \sigma_x dydz + \\ & + \left(\tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy \right) dx dz - \tau_{xy} dx dz + \left(\tau_{xz} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} dz \right) dx dy - \tau_{xz} dx dy = 0. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Sređivanjem prethodnog izraza i analognih izraza za drugi i treći uslov ravnoteže sila elementarnog paralelopipeda (3.2) dobija se *sistem parcijalnih diferencijalnih jednačina statičke ravnoteže* ili kratko - *jednačine ravnoteže*.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

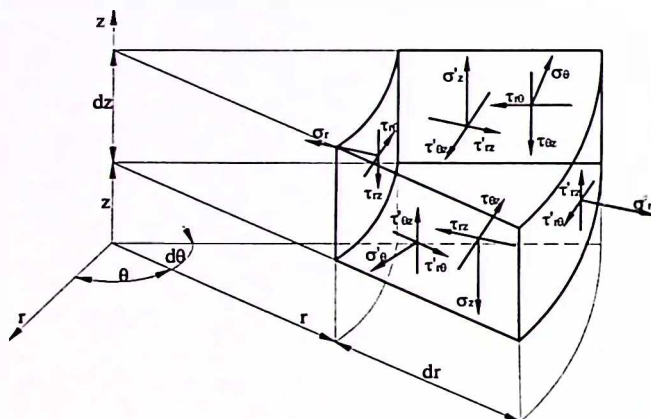
Iz tri momentna uslova ravnoteže (3.3) izvodi se stav o konjugovanosti tangencijalnih napona:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \quad \tau_{xz} = \tau_{zx}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (3.6)$$

pa je tenzor napona simetričan u odnosu na glavnu dijagonalu:

$$T_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix} \quad (3.7)$$

U cilindričnom koordinatnom sistemu elementarni djelić, opterećen komponentama napona, ima oblik dat na Slici 3.2.



Slika 3.2. Elementarni djelić u cilindričnom koordinatnom sistemu

Analognom analizom kao kod elementarnog paralelopipeda u pravouglom koordinatnom sistemu, dobija se sistem parcijalnih diferencijalnih jednačina ravnoteže u cilindričnim koordinatama:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

i tenzor napona, koji ima oblik:

$$T_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_r & \tau_{r\theta} & \tau_{rz} \\ \tau_{r\theta} & \sigma_\theta & \tau_{\theta z} \\ \tau_{rz} & \tau_{\theta z} & \sigma_z \end{vmatrix} \quad (3.9)$$

Kod analize osno simetričnih problema najpogodnija je upotreba cilindričnog koordinatnog sistema. Po definiciji osno simetričnih problema, ravni $\theta = \text{const.}$ su glavne ravni, tj. u njima ne postoje smičući naponi ($\tau_{r\theta} = \tau_{\theta z} = 0$) [92]. Tenzor napona na taj način dobija oblik:

$$T_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_r & 0 & \tau_{rz} \\ 0 & \sigma_\theta & 0 \\ \tau_{rz} & 0 & \sigma_z \end{vmatrix}, \quad (3.10)$$

a jednačine ravnoteže (3.8) se svode na:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

Efektivni napon ili *intenzitet napona* predstavlja kvantitativnu mjeru ukupnog napona i proporcionalan je drugoj invarijanti devijatora tenzora napona [42,67]. Za slučaj osnosimetričnog naponskog stanja on je:

$$\sigma_e = \sqrt{3|I_2(D_o)|} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + 6\tau_{rz}^2}. \quad (3.12)$$

Devijator tenzora napona je tenzor:

$$D_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_r - \sigma_{sr} & 0 & \tau_{rz} \\ 0 & \sigma_\theta - \sigma_{sr} & 0 \\ \tau_{rz} & 0 & \sigma_z - \sigma_{sr} \end{vmatrix}, \quad (3.13)$$

gdje je srednji normalni napon jednak trećini prve invarijante tenzora napona (3.9) i (3.10):

$$\sigma_{sr} = \frac{1}{3} I_1(T_\sigma) = \frac{1}{3} (\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z). \quad (3.14)$$

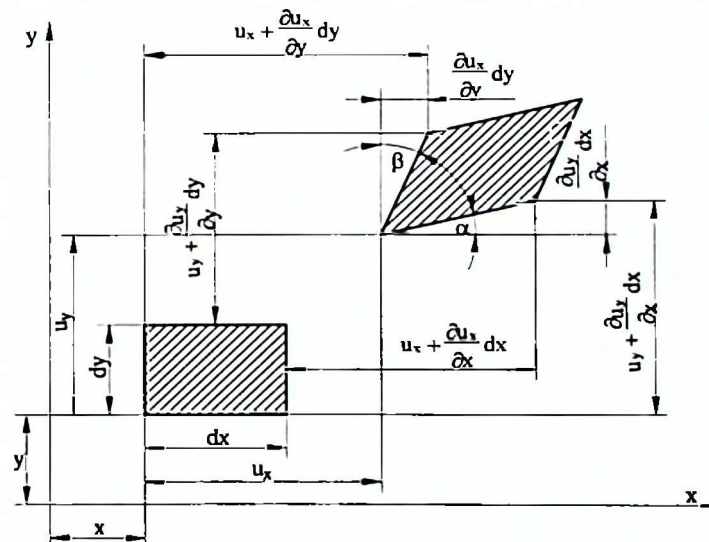
Intenzitet napona ima veliki značaj u teoriji plastičnog tečenja zato što po hipotezi najveće deformacione energije utrošene na promjenu oblika elementarni djelić prelazi iz elastičnog u plastično stanje kada intenzitet napona dostigne graničnu vrijednost. Iz (3.12) se dobija:

$$(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + 6\tau_{rz}^2 = 2\sigma_e^2, \quad (3.15)$$

što ujedno prestavlja uslov plastičnog tečenja za osnosimetrično naponsko stanje.

3.2. DEFORMACIJE

Ako je čvrsto tijelo fiksirano, tj ne postoji mogućnost njegovog kinematskog pomjeranja, onda pod dejstvom spoljašnjih opterećenja dolazi do promjene međusobnog položaja tačaka toga tijela, pa se pod deformacijom podrazumijeva promjena rastojanja između tačaka tijela i promjena uglova među različitim pravcima [81]. Analogno sa teorijom napona može se posmatrati elementarni paralelopiped u pravouglim koordinatama (Slika 3.3.), kao i komponente deformacije.



Slika 3.3. Elementarni paralelopiped u ravni xOy

Ako komponente deformacije karakterišu promjene dužina i uglova pri deformaciji, onda se tenzor konačne deformacije može zapisati u obliku:

$$T_e = \begin{vmatrix} e_x & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_y & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_z \end{vmatrix}. \quad (3.16)$$

Komponente tenzora konačne deformacije se određuju na osnovu komponenata pomjeranja u različitim pravcima tačaka tijela koje se deformiše. Odgovarajućim izvođenjem dobija se:

$$\left. \begin{aligned} e_x &= \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 \right] \\ e_y &= \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^2 \right] \\ e_z &= \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 \right] \\ e_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \\ e_{yz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \\ e_{zx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

Za male deformacije uglovi α i β (Slika 3.3.) se smatraju malim vrijednostima, pa je deformacija u pravcu ose x:

$$\varepsilon_x = \frac{\left(u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} dx + dx - u_x \right) - dx}{dx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (3.18)$$

Analognim izvođenjem se dobijaju izrazi za ostale linijske i ugaone male deformacije:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u_x}{\partial x} & \gamma_{xy} &= \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial u_y}{\partial y} & \gamma_{yz} &= \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial u_z}{\partial z} & \gamma_{zx} &= \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

Na ovaj način je izvršena linearizacija konačnih deformacija (3.17) i dolazi se do tenzora male deformacije, ili kako se još naziva tenzora čiste deformacije ili samo deformacije:

$$T_e = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \frac{1}{2} \gamma_{xz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \varepsilon_y & \frac{1}{2} \gamma_{yz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{xz} & \frac{1}{2} \gamma_{yz} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

U cilindričnom koordinatnom sistemu, analognim izvođenjem se može pokazati da su komponente tenzora deformacije:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r} & \gamma_{r\theta} &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} & \gamma_{\theta z} &= \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial u_z}{\partial z} & \gamma_{rz} &= \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

Kod osnosimetričnog naponskog stanja nema pomjeranja u tangencijalnom pravcu i promjene preostala dva pomjeranja u tom pravcu [22] su:

$$u_\theta = 0, \quad \frac{\partial u_r}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial u_z}{\partial \theta} = 0, \quad (3.22)$$

pa komponente tenzora deformacije postaju:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r} & \gamma_{r\theta} &= 0 \\ \varepsilon_\theta &= \frac{u_r}{r} & \gamma_{\theta z} &= 0 \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial u_z}{\partial z} & \gamma_{rz} &= \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \end{aligned} \right\}, \quad (3.23)$$

a tenzor deformacije kod osnosimetričnog deformacionog stanja je:

$$T_\varepsilon = \begin{vmatrix} \varepsilon_r & 0 & \frac{1}{2}\gamma_{rz} \\ 0 & \varepsilon_\theta & 0 \\ \frac{1}{2}\gamma_{rz} & 0 & \varepsilon_z \end{vmatrix}. \quad (3.24)$$

Veličina koja se definiše kao:

$$\varepsilon_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{I_2(T_\varepsilon)} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_z)^2 + \frac{3}{2}\gamma_{rz}^2}, \quad (3.25)$$

gdje $I_2(T_\varepsilon)$ predstavlja drugu invarijantu tenzora deformacije (3.24) [67], je *efektivna deformacija* ili *intenzitet deformacije*, koja kvantitativno karakteriše stepen promjene oblika posmatranog djelića tijela i izražava se u zavisnosti od komponentata deformacije.

3.3. BRZINE DEFORMACIJA

Da bi se definisala brzina deformacije, najprije se definiše brzina pomjeranja kao izvod pomjeranja po vremenu, pa su komponente brzine pomjeranja u pravcu tri ose pravouglog koordinatnog sistema:

$$v_x = \frac{\partial u_x}{\partial t}, \quad v_y = \frac{\partial u_y}{\partial t}, \quad v_z = \frac{\partial u_z}{\partial t}. \quad (3.26)$$

Brzina deformacije u opštem slučaju predstavlja izvod deformacije po vremenu, ili odnos razlike brzina pomjeranja dvije tačke prema rastojanju tih tačaka, kad to rastojanje teži nuli. Komponente tenzora brzine deformacije i tenzor brzine deformacije su:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_x &= \frac{d\varepsilon_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial x} & \dot{\gamma}_{xy} &= \frac{d\gamma_{xy}}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \\ \dot{\varepsilon}_y &= \frac{d\varepsilon_y}{dt} = \frac{\partial v_y}{\partial y} & \dot{\gamma}_{yz} &= \frac{d\gamma_{yz}}{dt} = \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \\ \dot{\varepsilon}_z &= \frac{d\varepsilon_z}{dt} = \frac{\partial v_z}{\partial z} & \dot{\gamma}_{xz} &= \frac{d\gamma_{xz}}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \end{aligned} \right\}, \quad (3.27)$$

$$T_{\epsilon} = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_x & \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{xy} & \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{xz} \\ \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{xy} & \dot{\epsilon}_y & \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{yz} \\ \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{xz} & \frac{1}{2}\dot{\gamma}_{yz} & \dot{\epsilon}_z \end{bmatrix}. \quad (3.28)$$

Analogno prethodnom, za osnosimetrično naponsko stanje komponente tenzora brzine deformacije u cilindričnom koordinatnom sistemu, a na osnovu (3.23), su:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}_r &= \frac{\partial v_r}{\partial r} & \dot{\gamma}_{r\theta} &= 0 \\ \dot{\epsilon}_{\theta} &= \frac{v_r}{r} & \dot{\gamma}_{\theta z} &= 0 \\ \dot{\epsilon}_z &= \frac{\partial v_z}{\partial z} & \dot{\gamma}_{rz} &= \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \end{aligned} \right\} \quad (3.29)$$

Kao i kod efektivne deformacije, *efektivna brzina deformacije* ili *intenzitet brzine deformacije* je kvantitativna mjera promjene oblika [6]:

$$\dot{\epsilon}_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{I_2(T_{\epsilon})} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_{\theta})^2 + (\dot{\epsilon}_{\theta} - \dot{\epsilon}_z)^2 + (\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_z)^2 + \frac{3}{2}\dot{\gamma}_{rz}^2}. \quad (3.30)$$

3.4. TEORIJA PLASTIČNOG TEČENJA

Teorija malih elastično plastičnih deformacija bazira se na postavci da su, u uslovima prostog opterećenja, devijator tenzora deformacije i devijator tenzora napona (3.13) slični i koaksijalni, tj. njihovi pravci se poklapaju. Međutim sa porastom deformacija narušava se koaksijalnost pomenuta dva devijatora [81].

Kod većine procesa obrade deformisanjem radi se sa većim stepenima deformacije i u uslovima složenog opterećenja. Eksperimenti pokazuju da se kod većih deformacija glavne ose napona poklapaju sa glavnim osama brzine deformacije iz čega slijedi da su devijator tenzora napona i devijator tenzora brzine deformacije slični i koaksijalni. Ako se ukupan priraštaj deformacija posmatra kao zbir elastičnog i plastičnog dijela, onda je kod većine procesa elastični dio mnogo manji od plastičnog. Po *teoriji plastičnog tečenja* koju su predložili *M. Levy* i *R. Mises*, elastične deformacije se zanemaruju u odnosu na plastične.

Takođe, u obradi deformisanjem je promjena zapremine zanemarljivo mala u odnosu na konačne plastične deformacije. Zapreminska deformacija se može izraziti kao zbir tri odgovarajuće normalne komponente deformacije (3.23, 3.24) i jednaka je prvoj invarijanti tenzora deformacije. Dakle, tijelo koje se deformiše smatra se nestišljivim, pa je prva invarijanta tenzora deformacije [67] jednaka nuli:

$$I_1(T_{\epsilon}) = \epsilon_r + \epsilon_{\theta} + \epsilon_z = 0, \quad (3.31)$$

što predstavlja *uslov nestišljivosti* u cilindričnom koordinatnom sistemu. Na osnovu toga, priraštaj komponente deformacije uslovljava isključivo promjenu oblika tijela.

Na osnovu teorije plastičnog tečenja uspostavljaju se jednačine koje daju funkcionalnu vezu priraštaja komponenta plastične deformacije sa komponentama napona i to na osnovu hipoteze o sličnosti i koaksijalnosti devijatora tenzora napona i tenzora priraštaja plastične deformacije:

$$D_{de} = d\lambda D_{\sigma}. \quad (3.32)$$

Ako se jednačina (3.32) podijeli sa vremenskim intervalom dt u kojem je nastao priraštaj komponenta deformacije, tada se dobija jednačina veze tenzora brzine deformacije i devijatora tenzora napona:

$$D_{\dot{\epsilon}} = \lambda' D_{\sigma}, \quad (3.33)$$

koja se naziva *jednačina Levy-Mises*. U cilindričnom koordinatnom sistemu za osnosimetrično naponsko deformaciono stanje jednačine *Levy-Mises* imaju oblik:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}_z &= \lambda' (\sigma_z - \sigma_{sr}) = \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \dot{\epsilon}_{\theta} &= \lambda' (\sigma_{\theta} - \sigma_{sr}) = \frac{v_r}{r} \\ \dot{\epsilon}_r &= \lambda' (\sigma_r - \sigma_{sr}) = \frac{\partial v_r}{\partial r} \\ \dot{\gamma}_{rz} &= 2\lambda' \tau_{rz} = \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \end{aligned} \right\}. \quad (3.34)$$

Za koeficijent proporcionalnosti λ' u (3.33 i 3.34) se dobija da je:

$$\lambda' = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}_e}{\sigma_e}. \quad (3.35)$$

3.5. METODI REŠAVANJA NAPONSKO DEFORMACIONOG STANJA

Kod osno simetričnih problema može se postaviti sistem koji čine *osnovne jednačine teorije plastičnosti*, a koji se sastoji od sledećeg:

1. jednačine ravnoteže (3.11),
2. uslov plastičnog tečenja (3.15) i
3. veze napon-brzina deformacija (jednačine *Levy-Mises-a*) (3.34).

U ovom sistemu jednačina nepoznate su četiri komponente napona (σ_r , σ_z , σ_{θ} i τ_{rz}), dvije komponente brzine (v_r i v_z) i koeficijent λ' . Dati sistem sa sedam jednačina i sedam nepoznatih praktično je nerješiv, osim za neke specijalne slučajeve, zato što u konkretnim problemima su poznate granične vrijednosti napona, a ne njihovi izvodi, što bi za rješavanje ovog sistema bilo potrebno.

Za analizu procesa deformisanja razvijeni su različiti metodi od kojih se navode:

- Metod rešenja jednačina teorije plastičnosti,
- Metod linija klizanja,
- Metod gornje granice,
- Metod konačnih elemenata,
- Metod visioplastičnosti
- Metod određivanja kontaktnih napona,
- Varijacioni metodi,
- Metod otpornosti materijala plastičnom deformisanju,
- Metod korišćenja modela,
- Metod fotoplastičnosti.

Pregled i kritički osvrt nekih od navedenih metoda je dat u radu [92], a za istraživanja naponsko deformacionog stanja u ovoj disertaciji autor se opredijelio za metod visioplastičnosti koji će biti detaljnije objašnjen.



3.5.1. Metod visioplastičnosti

Jedan od metoda za rešavanje naponsko deformacionog stanja je metod visioplastičnosti. To je eksperimentalno teorijski metod koji omogućava određivanje kinematskih i naponskih komponenti u procesu deformisanja. Ovim metodom moguće je analizirati ravanske i osnosimetrične probleme obrade deformisanjem. Metod se zasniva na osnovim jednačinama teorije plastičnosti (3.11), (3.15) i (3.34).

Kombinovanjem prve dvije jednačine iz (3.34) dobija se:

$$\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_r = \lambda'(\sigma_z - \sigma_r), \quad (3.36)$$

odakle se dobija da je:

$$\sigma_z = \frac{\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_r}{\lambda'} + \sigma_r. \quad (3.37)$$

Diferenciranjem gornje jednačine po r za konstantno z i θ dobija se da je:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial r} = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_r}{\lambda'} \right). \quad (3.38)$$

Iz prve jednačine ravnoteže sistema (3.11) dobija se da je:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = -\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z}, \quad (3.39)$$

dok se iz druge i treće jednačine veza napona i brzina deformacije sistema (3.34) dobija:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\dot{\epsilon}_r}{\lambda'} - \sigma_{sr} \\ \sigma_\theta &= \frac{\dot{\epsilon}_\theta}{\lambda'} - \sigma_{s\theta} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Zamjenom (3.40) u (3.38) dobija se:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \frac{\dot{\epsilon}_\theta - \dot{\epsilon}_r}{\lambda' r} - \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z}. \quad (3.41)$$

Ako se gornji izraz zamijeni u jednačinu (3.38) dobija se:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial r} = -\frac{\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_\theta}{\lambda' r} - \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_r}{\lambda'} \right). \quad (3.42)$$

Kako je iz četvrte jednačine *Levy-Mises*-a sistema (3.34):

$$\tau_{rz} = \frac{\dot{\gamma}_{rz}}{2\lambda'}, \quad (3.43)$$

to jednačina (3.42) dobija oblik:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_r}{\lambda'} \right) - \frac{\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_\theta}{\lambda' r} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\dot{\gamma}_{rz}}{2\lambda'} \right). \quad (3.44)$$

Zamjenom izraza (3.35) za λ' u jednačinu (3.44) dobija se:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial r} = \frac{2}{3} \sigma_e \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_r}{\dot{\epsilon}_e} \right) - \frac{\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_\theta}{r \dot{\epsilon}_e} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\dot{\gamma}_{rz}}{\dot{\epsilon}_e} \right) \right]. \quad (3.45)$$

Jednačina (3.45) predstavlja gradijent aksijalnog napona koji je zavistan od brzina deformacija i efektivnog napona u svakoj tački zone deformisanja. To je, ustvari, *osnovna jednačina visioplastičnosti*. Komponente brzina deformacija i efektivnog napona određuju se eksperimentalno, da bi se zatim određenim matematičkim operacijama preko jednačine (3.45) dobila vrijednost aksijalnog napona u relevantnim tačkama zapremine tijela. Jedina tačka gdje se

ne može odrediti aksijalni napon je za $r=0$, jer izraz (3.45) postaje neodređen. Međutim, zbog simetričnosti procesa u toj tački važi:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial r} = 0. \quad (3.46)$$

Iz gore navedenog vidi se da problem određivanja aksijalne komponente napona u procesu osno simetričnog deformisanja svodi se na problem određivanja komponenti brzina deformacije, efektivnog napona i efektivne deformacije u zoni deformisanja.

Poznavanjem aksijalnog napona u svakoj tački zapremine tijela lako se dolazi i do ostalih komponenti napona korišćenjem jednačina *Levy-Mises*-a (3.34)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_z + \frac{2}{3} \sigma_e \left(\frac{\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_z}{\dot{\epsilon}_e} \right) \\ \sigma_\theta &= \sigma_z + \frac{2}{3} \sigma_e \left(\frac{\dot{\epsilon}_\theta - \dot{\epsilon}_z}{\dot{\epsilon}_e} \right) \\ \tau_{rz} &= \frac{\sigma_e}{3} \frac{\dot{\gamma}_{rz}}{\dot{\epsilon}_e} \end{aligned} \right\}. \quad (3.47)$$

3.5.1.1. Određivanje kinematskog polja po zapremini obradka

Osnova za određivanje naponskog stanja metodom visioplastičnosti je poznavanje kinematskog polja. Razlikuju se dvije vrste procesa:

- *stacionarni* (vučenje, valjanje, istosmjerno istiskivanje) i
- *nestacionarni* (suprotnosmjerno istiskivanje, presovanje u otvorenim kalupima).

Za stacionarne procese je karakteristično da su elementi kinematskog i naponskog polja u jednoj nepokretnoj tački prostora u kome se odvija deformisanje nezavisni od vremena. Dakle, kinematsko polje se može odrediti eksperimentalnim putem u bilo kom trenutku (etapi). Takođe nije od značaja ni dužina etape pod pretpostavkom konstantne brzine deformisanja. Kod nestacionarnih procesa kinematsko i naponsko polje u jednoj nepokretnoj tački prostora u kome se odvija deformisanje, se mijenja u toku vremena. U takvim procesima analiza jednog određenog priraštaja deformacije ne može dati sliku o kinematskom i naponskom polju za vrijeme cijelog procesa, nego samo za posmatrani priraštaj. Zato je potrebno odrediti interval (etapu) na kraju kojega bi se odredilo naponsko stanje u zapremini obratka.

Nalaženje kinematskog polja potrebnog za rješavanje osnovne jednačine visioplastičnosti (3.45), vrši se eksperimentalnim putem. Na osnovu izmjerenih veličina pomjeranja tačaka meridijalnog presjeka i vremena trajanja intervala, moguće je odrediti komponente brzina pomjeranja prema:

$$\left. \begin{aligned} v_r &= \frac{r_0 - r}{\Delta t} = \frac{\Delta r}{\Delta t} \\ v_z &= \frac{z_0 - z}{\Delta t} = \frac{\Delta z}{\Delta t} \end{aligned} \right\}. \quad (3.48)$$

Pretpostavka za ovakav način određivanja brzina jeste konstantna brzina deformisanja.

3.5.1.2. Određivanje komponenti brzina deformacije

Poznavanjem kinematskog polja, tj. rasporeda brzina pomjeranja, moguće je za tačke meridijalnog presjeka odrediti brzine deformacije prema (3.29), dok se efektivna brzina deformacije određuje prema izrazu (3.30). Parcijalni izvodi se određuju za dovoljno male vrijednosti Δr , Δz i Δt na osnovu sledećih izraza:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} = \frac{\Delta v_r}{\Delta r}, \quad (3.49)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{\Delta v_z}{\Delta z}, \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} = \frac{\Delta v_r}{\Delta z} + \frac{\Delta v_z}{\Delta r}. \quad (3.51)$$

3.5.1.3. Određivanje komponenti napona

Raspored aksijalnog napona σ_z u ravnima $z=\text{const.}$ dobija se integracijom osnovne jednačine visioplastičnosti (3.45):

$$\sigma_z = \int_0^r \frac{2}{3} \sigma_e \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_r}{\dot{\epsilon}_e} \right) - \left(\frac{\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_\theta}{r \dot{\epsilon}_e} \right) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\dot{\gamma}_{rz}}{\dot{\epsilon}_e} \right) \right] dr + C. \quad (3.52)$$

Za dobijanje apsolutne vrijednosti aksijalnih napona potrebno je odrediti integracionu konstantu C . Iz jednačine (3.47) moguće je dobiti izraz za aksijalni napon u svakoj tački zone deformacije u obliku:

$$\sigma_z = \sigma_r - \frac{2}{3} \sigma_e \left(\frac{\dot{\epsilon}_r - \dot{\epsilon}_z}{\dot{\epsilon}_e} \right). \quad (3.53)$$

Radijalni napon σ_r nije poznat po čitavoj zoni deformacije, ali na slobodnoj površini u presjeku vijenca on je jednak nuli, što znači da je u tom presjeku moguće odrediti aksijalni napon. Ako se sa $\Delta \sigma_z$ obilježi prvi član u izrazu (3.52) za aksijalni napon, onda se može pisati:

$$\sigma_z = \Delta \sigma_z + C. \quad (3.54)$$

U tački slobodne površine na kraju vijenca može se odrediti integraciona konstanta na sledeći način:

$$C = \sigma_z \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=r_v}} - \Delta \sigma_z \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=r_v}} \quad (3.55)$$

Dakle, postupak određivanja elemenata tenzora napona pomoću metode visioplastičnosti, moguće je podijeliti u nekoliko faza:

1. Priprema uzoraka na odgovarajući način,
2. Deformisanje uzoraka i očitavanje deformisane mreže,
3. Određivanje komponenata brzina u svakoj tački mreže,
4. Određivanje elemenata osnovne jednačine visioplastičnosti i
5. Određivanje komponenata napona.

Postoje različite varijante ove metode. Razlike među pojedinim metodama sastoje se u načinu nanošenja mreže, analize deformisane mreže, ali i u daljoj teorijskoj obradi podataka. Metoda visioplastičnosti je naročito dobila na značaju sa pojavom računara.

3.6. KONTAKTNO TRENJE

Jedan od najvažnijih parametara u obradi deformisanjem jeste *kontaktno trenje*. To je parametar otpora koji nastaje pri pomjeranju jednog tijela u odnosu na drugo, tj. čestica materijala obradka u odnosu na djelove alata sa kojima je u kontaktu. Uticaj trenja se ogleda na tečenje materijala, radnu silu, deformacioni rad, habanje alata, pa je poznavanje ovog faktora od velikog značaja za projektovanje tehnoloških postupaka obrade deformisanjem. Naročito je značajno za numeričke simulacije metodom konačnih elemenata. Od pravilno uzete vrijednosti pokazatelja kontaktnog trenja, umnogome zavisi poklapanje rezultata numeričke simulacije sa realnim [22,70,91,129]. Kontaktno trenje sa aspekta zapreminskog deformisanja u otvorenim klupima i šire, detaljno je dato u radu [75].

Kontaktno trenje u obradi deformisanjem se razlikuje od trenja koje se javlja između krutih tijela u kontaktu - *mašinskog trenja*. Kada je jedno od tijela u stanju plastičnog tečenja ono se još naziva plastičnim. Usled plastične deformacije raste kompaktnost kontaktnih površina, odnosno, raste odnos površine kontakta prema zapremini tijela.

Za matematičko opisivanje kontaktnog trenja najčešće se koriste:

1. Coulomb-ov zakon (*Amonton-ov zakon* - zakon klizanja),
2. Zakon konstantnog trenja (zakon lijepljenja) i
3. Adhezioni teorija.

Po *Coulomb-ovom zakonu* trenje je proporcionalno normalnom pritisku, a mjera proporcionalnosti je *koeficijent trenja* μ :

$$\tau = \mu p, 0 \leq \mu \leq 0.577. \quad (3.56)$$

Ovaj zakon važi u oblastima malih normalnih pritisaka.

Zakon konstantnog trenja pretpostavlja konstantni tangencijalni napon trenja, a izražava se preko *faktora trenja* m :

$$\tau = mk, 0 \leq m \leq 1. \quad (3.57)$$

Ovo važi pri postojanju velikih normalnih pritisaka.

Veza između koeficijenta trenja μ i faktora trenja m date je relacijom [115]:

$$\mu = \frac{m}{\sqrt{3}}. \quad (3.58)$$

U brojnim radovima koji se bave problemima trenja je pokazano da oba zakona nemaju generalnu važnost.

Adhezioni teorija trenja uzima u obzir hrapavost kontaktnih površina i postojanje neravnina i pokriva sve oblasti pritisaka. *Wanheim* i *Bay* su na bazi ove teorije postavili matematički model trenja [11,12,144]:

$$\tau = f \alpha k, 0 \leq f \leq 1. \quad (3.59)$$

gdje je α - odnos realne i proračunate površine kontakta.

Veza između koeficijenta trenja μ i faktora trenja f u oblastima manjih pritisaka data je po *Danckert-u* naponsko deformacionom analizom metodom linija klizanja [23]:

$$\mu = \frac{f}{1 + \frac{\pi}{2} + \arccos f + \sqrt{1 - f^2}}, \quad (3.60)$$

ili po *Bowden-Tabor-u* [11]:

$$\mu = \frac{f}{\sqrt{27(1 - f^2)}}. \quad (3.61)$$

Ovaj zakon trenja ima generalnu važnost i predstavlja, zapravo, kombinaciju Coulomb-ovog i zakona konstantnog trenja, jer, za male vrijednosti pritiska ($p/\sigma_0 < 1.5$) napon trenja je proporcionalan pritisku (3.56), a pri velikim vrijednostima ($p/\sigma_0 > 3$) napon trenja je konstantan (3.57) $\alpha \rightarrow 1$ (3.59). I u oblastima srednjih pritisaka ima dobru predstavu napona trenja.

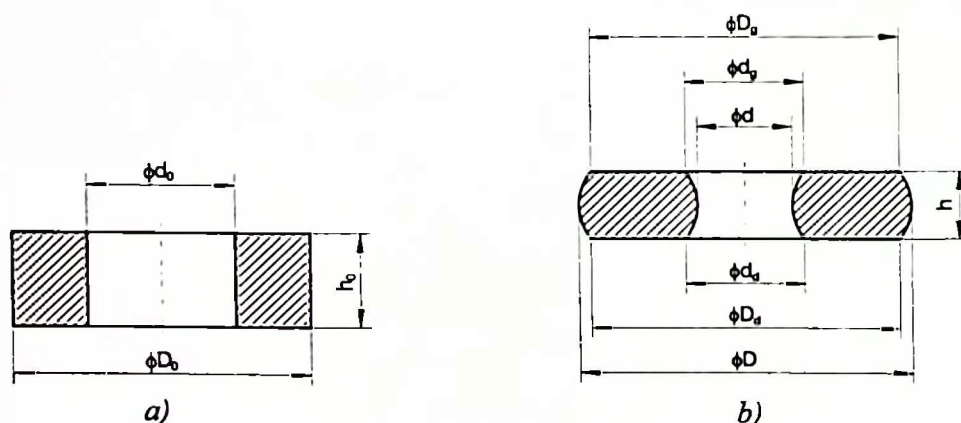
3.6.1. Metodi za određivanje koeficijenta/faktora trenja

Postoji veći broj metoda za određivanje koeficijenta/faktora trenja. Svi ovi metodi mogu se podijeliti u dvije grupe [51]:

1. *Direktni metodi* - metodi kod kojih se kontaktno trenje određuje neposrednim eksperimentalnim mjerenjem pomoću davača sila, momenata uvijanja i pritisaka ugrađenih u alate:
 - Simultani test pritiskivanja i uvijanja,
 - Određivanje koeficijenta/faktora trenja kod valjanja,
 - Određivanje koeficijenta/faktora trenja kod vučenja.
2. *Indirektni metodi* - metodi kod kojih se kontaktno trenje određuje praćenjem određenih, u prvom redu geometrijskih, parametara:
 - Gubkin-ov metod konusnih pritiskivača,
 - Određivanje koeficijenta/faktora trenja kombinovanim istiskivanjem,
 - Sabijanje lamela velike dužine (*cigaret test*),
 - Sabijanje prstena.

Jedan od najšire primjenjivanih metoda je *metod sabijanja prstena - metod Burgdorf-a (Ring Test)*. Istovremeno, to je metod koji daje zadovoljavajuće rezultate kod zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima, što je predmet istraživanja ove Disertacije, pa se autor odlučio za korišćenje upravo ovog metoda.

Metod sabijanja prstena se zasniva na sabijanju prstena između ravnih površina, čije se dimenzije nalaze u odnosu: $D_0:d_0:h_0=6:3:2$. Dimezije priprema su date na Slici 3.4.

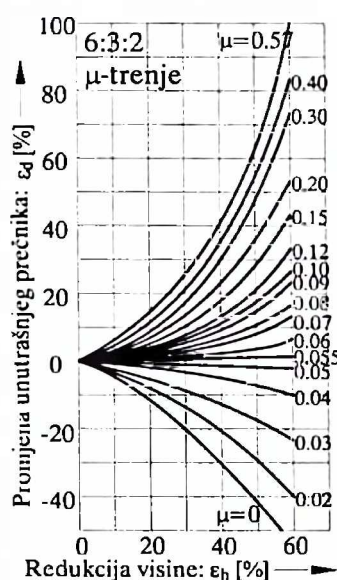


Slika 3.4. Prstenasti pripremak za određivanje koeficijenta/faktora trenja:
a) prije i b) u toku procesa deformisanja

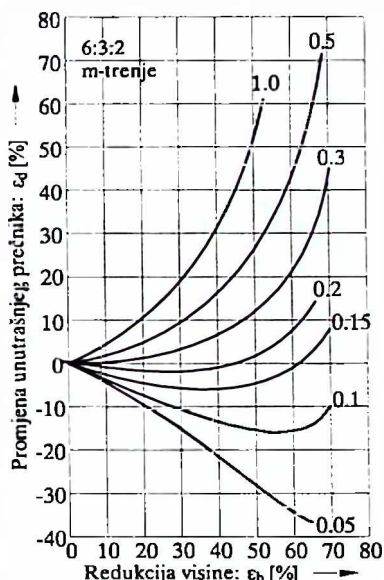
Pripremak se sabija do različitih visina h i određuju se deformacije visine i unutrašnjeg prečnika u procentima, po formulama:

$$\varepsilon_h = \frac{h_0 - h}{h_0} \times 100\%, \quad \varepsilon_d = \frac{d_0 - d}{d_0} \times 100\%. \quad (3.62)$$

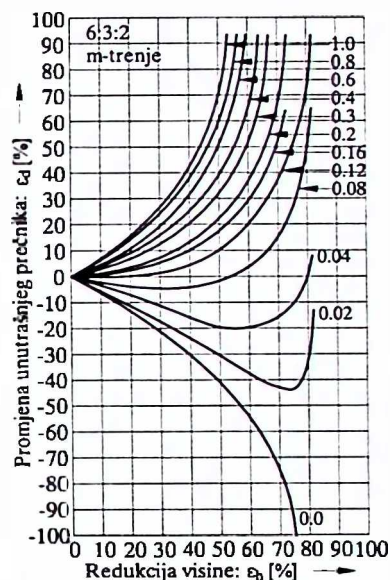
Nekoliko ovako dobijenih tačaka se unosi u odgovarajuće *kalibracione dijagrame (etalon dijagrame)* za određivanje koeficijenta/faktora trenja. Za *ring test* sa odnosom dimenzija $D_0: d_0:h_0=6:3:2$ postoji veći broj ovih dijagrama, dobijenih po raznim autorima. Za koeficijent trenja μ *Male* i *Cockcroft* su eksperimentalno ustanovili kalibracioni dijagram (Slika 3.5.) [46,74]. Za faktor trenja m *Lee* i *Altan* [70] i *Liu* [71] su predložili kalibracione dijagrame dobijene na bazi analize sabijanja kružnog prstena metodom gornje procjene (Slika 3.6. i Slika 3.7.). *Danckert* i *Wanheim* su naponsko deformacionom analizom došli do kalibracionih dijagrama za faktor trenja m kod idealno plastičnog materijala i faktor trenja f kod materijala koji deformaciono ojačava (Slika 3.8. i Slika 3.9.) [23].



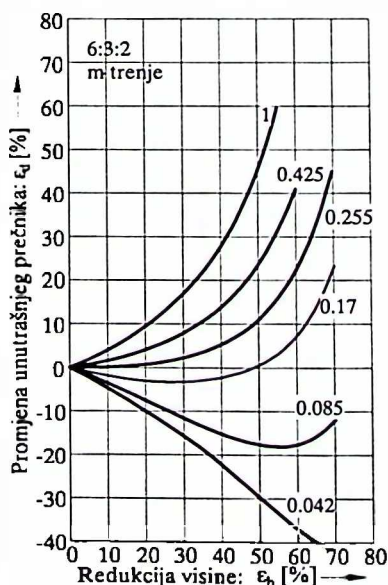
Slika 3.5. Male-Cockcroft kalibracioni dijagram za koeficijent trenja μ



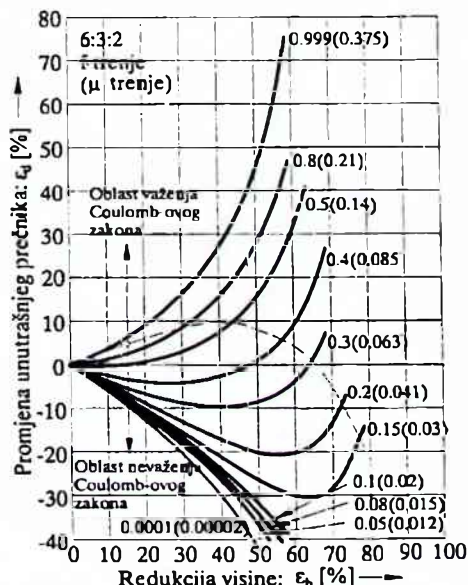
Slika 3.6. Lee-Altan kalibracioni dijagram za faktor trenja m



Slika 3.7. Liu kalibracioni dijagram za faktor trenja m



Slika 3.8. Wanheim-Danckert kalibracioni dijagram za faktor trenja m kod idealno plastičnog materijala



Slika 3.9. Wanheim-Danckert kalibracioni dijagram za faktor trenja m kod materijala koji deformaciono ojačava

3.7. SPECIFIČNI DEFORMACIONI OTPOR

Uspješno projektovanje i ostvarivanje tehnološkog procesa obrade deformisanjem nije moguće izvesti bez poznavanja određenih karakteristika materijala koji se obrađuje, među kojima u prvom redu spada *specifični deformacioni otpor* ili *napon tečenja* [91,93].

Da bi se odredio specifični deformacioni otpor, odnosno napon tečenja, ili, kako se još naziva *stvarni napon*, na osnovu koga se definišu ostali parametri procesa plastičnog deformisanja, neophodno je posjedovati krivu ojačavanja datog materijala. *Kriva ojačavanja* predstavlja grafički iskazanu vezu između napona tečenja i određenog vida deformacije u području plastičnosti. Kriva ojačavanja ili kako se još naziva *kriva tečenja*, može se definisati i kao veza između efektivnog napona i efektivne deformacije [91]. Određuju se eksperimentalnim putem, pomoću većeg broja metoda koje se baziraju na svim vrstama opterećenja:

- istezanju,
- sabijanju i
- uvijanju.

Sa stanovišta pretpostavki teorije plastičnosti:

- homogen materijal,
- bez prisustva anizotropije,
- ravnomjerna deformacija,
- bez uzimanja u obzir Bušingerovog efekta,
- bez uticaja istorije deformisanja,

kriva ojačavanja je jedinstvena bez obzira na naponsko stanje pomoću kojeg se ostvaruje deformisanje, pa je jedni autori uzimaju kao takvu [106]. Kada bi ove pretpostavke bile moguće onda bi eksperimentalno određivanje krivih ojačavanja bilo moguće u laboratorijskim uslovima sa bilo kojom naponskom šemom [129].

Drugi autori smatraju da nije moguće idealnu krivu ojačavanja, dobijenu u laboratorijskim uslovima, uzeti za aproksimaciju realnih uslova iz razloga što u inženjerskoj praksi nema homogenog materijala i nema homogenog deformisanja. Zbog toga krive ojačavanja veoma zavise od načina deformisanja pa je već postalo pravilo da se, pri određivanju krivih ojačavanja, bira takva šema opterećenja kojom će u najvećoj mjeri biti simulirana obrada metala deformisanjem u realnim uslovima. To je samo jedan od razloga zbog kojega je razvijen veliki broj metoda za određivanje krivih ojačavanja od strane velikog broja autora.

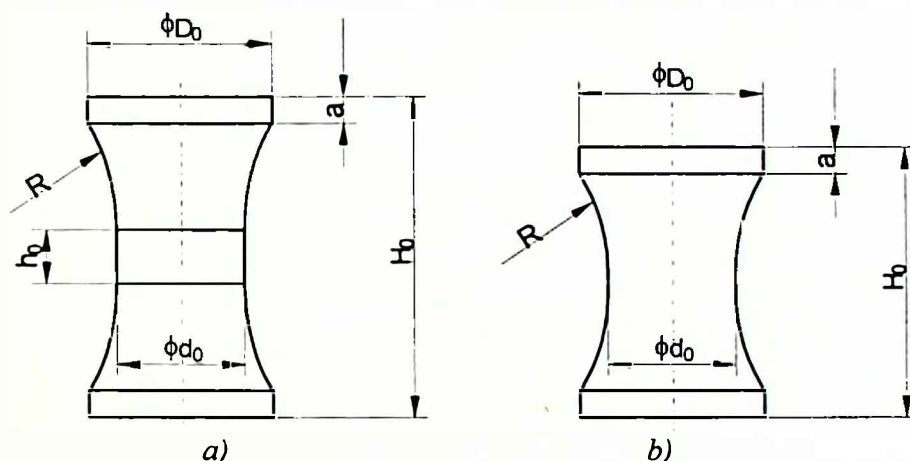
Sa druge strane, na napon tečenja, odnosno krive ojačavanja ima uticaj veliki broj faktora. Najveći uticaj imaju, u prvom redu, stepen deformacije, brzina deformacije i temperatura. Razvijeni metodi uzimaju u obzir neke od uticajnih faktora. U ovom radu se daju kraći pregledi nekih od metoda koji se koriste, a koji se međusobno znatno razlikuju.

3.7.1. Metod izražene zone deformacije (MIZOD)

Metod izražene zone deformacije (MIZOD) [137] omogućava relativno lako eliminisanje trenja i na taj način uspostavljanje linijskog naponskog stanja i može se primijeniti za svaki metalni materijal bez posebnog prilagođavanja.

MIZOD se bazira na ideji sabijanja necilindričnih komada kod kojih čeon dio ima znatno veću površinu u odnosu na središnji cilindrični dio. Pravilnim izborom površina postiže se u većoj mjeri eliminacija uticaja trenja na deformaciju središnjeg dijela. Prvobitna zamisao da prelaz sa jedne na drugu površinu bude prava koja odgovara bočnoj liniji zarubljene kupe nije prihvaćena iz razloga što je eksperimentalno utvrđeno da, usled naglog prelaza, središnji dio

karakteristiše neravnomjerno deformisanje, pa je prelaz izveden po luku kruga. Oblik priprema za određivanje krivih ojačavanja po MIZOD je dat na Slici 3.10. [85].



Slika 3.10. Priprema za MIZOD: a) sa središnjim dijelom i b) bez središnjeg dijela

Pri izboru geometrijskih veličina koje definišu priprema treba uzeti u obzir određene preporuke geometrijskih odnosa:

- odnos D/d_0 je odnos površina čela i središnjeg dijela treba da se uzme tako da se postigne ravnomjerna deformacija središnjeg dijela, a da čeonu trenje ima zanemarljiv uticaj (preporučene vrijednosti su: $D/d_0=1.3\div 1.5$),
- radijus R se uzima dovoljno mali da se ostvari potrebna kontrakcija ne rizikujući izvijanje ($H \leq 2.5d_0$) i dovoljno veliko da prelaz sa čeonog prečnika D na središnji prečnik d bude postepen (preporučene vrijednosti su: $R/d_0=1.2\div 1.6$),
- visinu središnjeg dijela h_0 , kao i ukupnu visinu H_0 treba uzeti tako da ne dođe do izvijanja (preporučene vrijednosti su: $h_0/d_0 \approx 0.4$),
- visinu čeonog cilindričnog dijela treba uzeti dovoljno malu, da se ne naruši traženo naponsko stanje i dovoljno veliku, da ne dođe do suviše velikog pomjeranja metala na čelu uzorka, čime se javljaju velike sile trenja koje imaju uticaj na deformaciju središnjeg cilindričnog dijela (preporučene vrijednosti su: $a/d_0=0.18\div 0.22$).

Za nalaženje zavisnosti napona tečenja od stepena deformacije koriste se dva priprema koji imaju sve geometrijske parametre iste osim visine središnjeg dijela, koja je kod jednog priprema jednaka $h_0=0$. (Slika 3.10.). Sabijanje priprema sa izuzetkom središnjeg cilindričnog dijela (b) je obuhvaćeno pripremkom (a), čime se postiže mogućnost praćenja deformacije cilindričnog dijela i uspostavljanje veze specifičnog deformacionog otpora sa stepenom deformacije, tj. krive ojačavanja.

Ako se prihvati idealizovano sabijanje središnjeg cilindra bez uticaja trenja u uslovima linijskog naponskog stanja za neku fazu sabijanja, mogu se uspostaviti sledeće relacije:

$$\Delta h = \Delta h_a - \Delta h_b, \quad (3.63)$$

$$d = d_0 \sqrt{\frac{h_0}{h_0 - \Delta h}}, \quad (3.64)$$

$$A = \frac{d^2 \pi}{4}, \quad (3.65)$$

gdje su:

d_0, h_0 - početni prečnik i visina srednjeg cilindra,

Δs - veličina sabijanja cilindričnog dijela,

$\Delta h_a, \Delta h_b$ - veličine sabijanja komada (a) i komada (b) u nekoj fazi,

d - prečnik cilindričnog dijela nakon sabijanja u nekoj fazi,

A - površina poprečnog presjeka cilindričnog dijela.

Vrijednosti specifičnog deformacionog otpora i odgovarajući stepeni logaritamske deformacije nalaze se preko relacija:

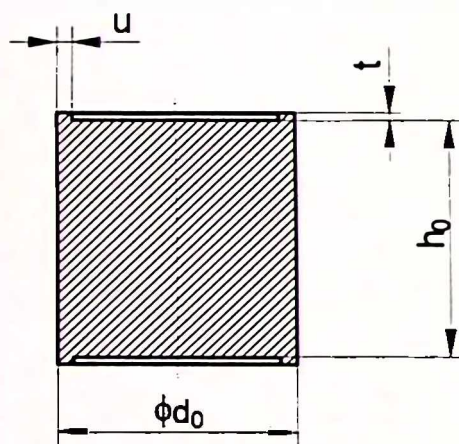
$$k = \frac{F}{A}, \quad (3.66)$$

$$\varphi = \ln \frac{h_0}{h_0 - \Delta h}. \quad (3.67)$$

Poslednje dvije relacije definišu tačke krivih ojačavanja.

3.7.2. Metod sabijanja hidrodinamičkim trenjem (MSHT)

Metod sabijanja hidrodinamičkim trenjem (MSHT) je predložio Rastegajev [42,106]. ovaj metod koristi epruvete sa čeonim udubljenjima koje se popunjavaju mazivom (Slika 3.11.).



Slika 3.11. Epruveta za MSHT

Pri sabijanju epruveta ovakve geometrije, trenje metala po metalu postoji jedino na prstenastim djelovima epruveta i to samo u početnim fazama deformisanja.

U daljem toku procesa deformisanja deformišu se samo prstenasti izdanci epruvete. Time se mazivo iz udubljenja prinudno istiskuje, razdvajajući na taj način u potpunosti čeonu površinu radnih ploča od čeonih površina epruvete. U takvim okolnostima postoji samo trenje metala po mazivu pa se može smatrati da egzistira *tečno - hidrodinamičko trenje*. O ovakvom trenju može se govoriti sve do trenutka eventualnog razaranja prstenastog izdanka, kada proces sabijanja treba prekinuti.

Važno je odrediti optimalne odnose dimenzija prstenastog izdanka epruvete u i t (Slika 3.11.).

U literaturi se mogu naći različite preporuke i zavisnosti ovih parametara [68,106] i one se kreću: $u=1.7\div 2.3$ [mm] i $t=1.6\div 0.65$ [mm].

Na ovaj način izbjegnuto je istiskivanje maziva sa kontaktnih površina koje nastaje pri sabijanju cilindričnih epruveta bez udubljenja. Uticaj tečnog trenja na veličinu specifičnog deformacionog otpora može se zanemariti. Pri pravilnom izboru dimenzija udubljenja i izboru maziva, mjerenjem prečnika na različitim mjestima po visini epruvete u toku procesa sabijanja, ne uočava se ispupčenost bočne površine za stepene deformacije 60-70%. Odsustvo ispupčenosti potvrđuje pretpostavka o linijskom naponskom stanju i povoljnosti metoda za određivanje napona tečenja.

Kao mazivo, zavisno od uslova deformisanja, najčešće se koriste grafitne, stearinske i silikonske masti. Vrijednost napona tečenja i stepena deformacije se određuju po izrazima (3.66) i (3.67) pa se na osnovu njih dobijaju tačke koje definišu krivu ojačavanja.

3.7.3. Šofmanov metod (ŠM)

Posebnu metodu konstrukcije krivih ojačavanja na osnovu proba na pritisak predložio je L. A. Šofman [68,82,106,116]. Ovaj autor koristi tri probna cilindrična uzorka istog prečnika d_0 , a različitih visina: $h_{01} > h_{02} > h_{03}$. Odnosi prečnika i visine kod sva tri probna uzorka su u granicama: $d_0/h_0 = 1.5 \div 4$. Probni uzorci se opterećuju na pritisak između ravni ploča. Prilikom sabijanja snima se dijagram promjene sile od radnog hoda $F=f(\Delta h)$, gdje je $\Delta h = h_0 - h$. Na osnovu toga se lako može dobiti zavisnost sile od stepena deformacije $F=F(\epsilon)$. Stepenu deformacije se računa po obrascu:

$$\epsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} \quad (3.68)$$

Ispitivanja pokazuju da sa porastom početnog odnosa d_0/h_0 raste i otpor trenja na kontaktnim površinama između uzorka i alata i u vezi sa tim povećava se i sila potrebna za deformaciju.

Iz uslova konstantnosti zapremine probnog uzorka, ne uzimajući u obzir ispupčenja bočnih površina, mogu se postaviti relacije:

$$V = A_0 h_0 = Ah = \text{const.} \quad (3.69)$$

tako da je površina poprečnog presjeka u trenutku sabijanja za visinu h :

$$A = A_0 \frac{h_0}{h} \text{ ili } \frac{d_0^2 \pi}{4} h_0 = \frac{d^2 \pi}{4} h, \quad (3.70)$$

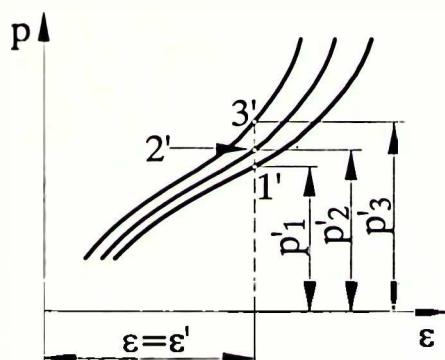
pa je trenutni prečnik probnog uzorka izražen u funkciji stepena deformacije:

$$d = d_0 \sqrt{\frac{h_0}{h}} = \frac{d_0}{\sqrt{1-\epsilon}} \quad (3.71)$$

Koristeći relacije (3.70) i (3.71) pritisak u nekom momentu sabijanja izražen u funkciji stepena deformacije je:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} (1-\epsilon). \quad (3.72)$$

Znajući zavisnost $F=F(\epsilon)$ i relaciju (3.72) moguće je za svaki probni uzorak konstruisati krivu $p=p(\epsilon)$, koja daje zavisnost promjene pritiska sa porastom stepena deformacije (Slika 3.12.).



Slika 3.12. Kriva promjene pritiska u funkciji stepena deformacije

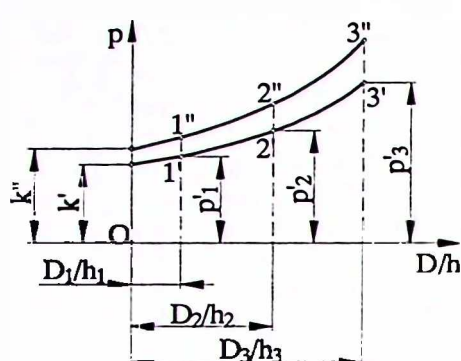
Sa slike se da uočiti da sa porastom odnosa d_0/h_0 raste i pritisak $p=p(\epsilon)$ za isti stepen deformacije ϵ' :

$$\text{Za } \frac{d_{03}}{h_{03}} > \frac{d_{02}}{h_{02}} > \frac{d_{01}}{h_{01}} \text{ je } p'_3 > p'_2 > p'_1 \text{ pri } \epsilon = \epsilon' \quad (3.73)$$

Da bi se dobila kriva ojačavanja potrebno je eliminisati uticaj spoljašnjeg trenja na tok krivih $p=p(\epsilon)$. Zbog toga se traži zavisnost pritiska p od tekućeg prečnika probnog uzorka D i visine h i koristeći (3.68) i (3.71) dobija se:

$$\frac{d}{h} = \frac{d_0}{h_0} \frac{1}{\sqrt{(1-\epsilon)^3}} \quad (3.74)$$

Na osnovu izvedenog obrasca prenose se ordinate tačaka (Slika 3.12.) koje odgovaraju nekom određenom stepenu deformacije $\epsilon = \epsilon'$ u dijagramu $p=p(d/h)$ (Slika 3.13.).



Slika 3.13. Promjena pritiska u funkciji odnosa D/h

Postupak se ponavlja za neki drugi stepen deformacije $\varepsilon = \varepsilon'' > \varepsilon'$ i tako se dobijaju tačke 1''-3'' itd. Kada se povežu tačke 1'-2'-3', ili 1''-2''-3'' nastaje neka eksponencijalna kriva, ili u krajnjem slučaju prava linija, koja pokazuje porast otpora trenja sa povećanjem odnosa d/h . Ako se krive ekstrapoliraju na ordinatu za vrijednost $d/h=0$ tada predstavljaju vrijednost pritiska pri sabijanju bez trenja, jer za vrijednost odnosa $d/h=0$ kontaktna površina je jednaka nuli.

Vrijednosti $k', k'', \dots, k^{(n)}$ odgovaraju stvarnim naponima za stepene deformacije $\varepsilon', \varepsilon'', \dots, \varepsilon^{(n)}$ čime se definišu tačke krivih ojačavanja $k=k(\varepsilon)$. Prema Šofmanu [24] primjenom ove metode mogu se dobiti pouzdani rezultati za vrijednosti do $\varepsilon=60\%$.

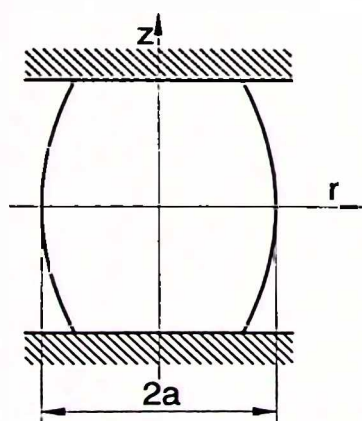
Veza stepena deformacije i logaritamskog stepena deformacije data je izrazom:

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon). \quad (3.75)$$

3.7.4. Uprošćeni metod (UM)

Uprošćeni metod određivanja specifičnog deformacionog otpora materijala zasnovan je na analizi rasporeda napona u presjeku cilindričnih uzoraka, podvrgnutih sabijanju između paralelnih ploča. On uzima u obzir uticaj nehomogene deformacije i jednostavan je za primjenu. Dobijene vrijednosti specifičnog deformacionog otpora ne zavise od odnosa dimenzija priprema ili kontaktnog trenja na graničnim površinama [100].

Na Slici 3.14. prikazan je cilindar podvrgnut sabijanju između dvije paralelne ploče sa jednakim koeficijentom trenja sa obje strane.



Slika 3.14. Sabijanje cilindra između paralelnih ploča

Podrazumijeva se da je odnos dimenzija početnog cilindra takav da je presjek u meridijalnoj ravni oblika bureta. U posmatranom slučaju nenulte vrijednosti imaju sledeće komponente napona: σ_r , σ_z , σ_θ i τ_{rz} , kao i komponente brzine u_r i u_z (u radijalnom i aksijalnom pravcu). Obodna brzina jednaka je nuli, a raspored napona i brzine ne zavise od koordinate θ i funkcije su samo od r i z .

Kod dalje analize polazi se od:

1. uslova plastičnog tečenja (3.15) i
2. jednačina Levy-Mises-a (3.34).

U presjeku $z=0$ je $\tau_{rz}=0$ za sve vrijednosti r i $\sigma_r=0$ za $r=a$. Jedan od graničnih uslova nastaje iz simetrije u odnosu na osu z .

Neka je $\dot{\varepsilon}_z$ konstantna u svakom presjeku i ne zavisi od koordinate r u srednjem presjeku ($z=0$). Ova pretpostavka proističe iz simetrije i potvrđena je eksperimentalno. Osim toga, iz uslova nestišljivosti (3.31) dobija se:

$$\dot{\varepsilon}_r + \dot{\varepsilon}_\theta + \dot{\varepsilon}_z = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0. \quad (3.76)$$

Rešenje poslednje jednačine (3.75) daje:

$$\dot{\varepsilon}_r = \dot{\varepsilon}_\theta = -\frac{\dot{\varepsilon}_z}{2}. \quad (3.77)$$

Prva dva iz veze *Levy-Mises* daju $\sigma_\theta = \sigma_\theta$ pri $\dot{\epsilon}_r = \dot{\epsilon}_\theta$, tada se kriterijum tečenja svodi na:

$$(\sigma_r - \sigma_z) = 0. \quad (3.78)$$

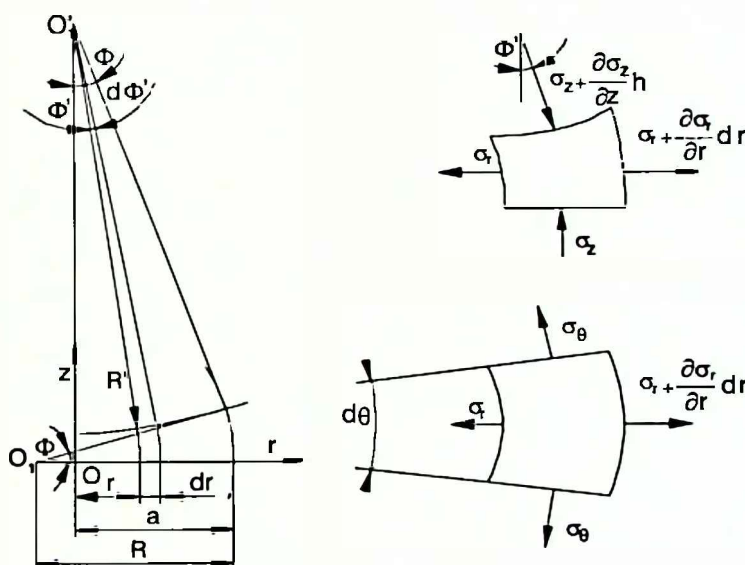
Na Slici 3.15. je prikazan element u blizini srednjeg presjeka koji je ograničen glavnim ravnima, a s desna su pokazane sile koje djeluju na njega.

Trajektorije glavnih napona su kružni lukovi (sa različitim radiusima krivine) u blizini srednjeg presjeka. Ova pretpostavka se može iskoristiti za dobijanje rasporeda napona u zoni izražene deformacije pri istezanju.

Razmatranjem ravnoteže sila koje djeluju na element (Slika 3.15.) u radijalnom pravcu dobija se :

$$\left(\sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial z} \right) \left(r + \frac{dr}{2} \right) \cdot d\theta \cdot dr \cdot \sin \Phi' + \left(\sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial z} h - dr \right) (r + dr) \cdot h' \cdot d\theta - \sigma_r \cdot h \cdot r \cdot d\theta - k \cdot h \cdot dr \cdot d\theta = 0, \quad (3.79)$$

gdje su: Φ , Φ' , h , h' , dr i $d\theta$ - male veličine. Izostavljajući članove nižeg reda, stavljajući da je:



Slika 3.15. Element u blizini srednjeg presjeka

$$\left. \begin{aligned} \Phi' &= \frac{r}{a} \Phi \\ h' - h &= \frac{r}{a} \Phi \cdot dr \\ h' &= \frac{2Ra - a^2 + r^2}{2a} \Phi \\ \sigma_\theta &= \sigma_r \\ \sigma_r - \sigma_z &= \sigma_\theta \end{aligned} \right\} \quad (3.80)$$

i uvrštavanjem u jednačinu (3.78) dobija se:

$$k \frac{r}{a} + \frac{d\sigma_r}{dr} \left(\frac{2Ra - a^2 + r^2}{2a} \right) = 0, \quad (3.81)$$

što nakon integracije i uslova: $\sigma_r=0$ za $\rho=a$ daje radijalni i aksijalni napon:

$$\sigma_r = k \cdot \ln \frac{2Ra}{2Ra - a^2 + r^2}, \quad (3.82)$$

$$\sigma_z = -k \cdot \ln \left(1 - \ln \frac{2Ra}{2Ra - a^2 + r^2} \right). \quad (3.83)$$

Konačan izraz za određivanje sile sabijanja se dobija iz integrala:

$$F = - \int_0^a \sigma_z \cdot 2\pi \cdot r dr, \quad (3.84)$$

što integraljenjem daje:

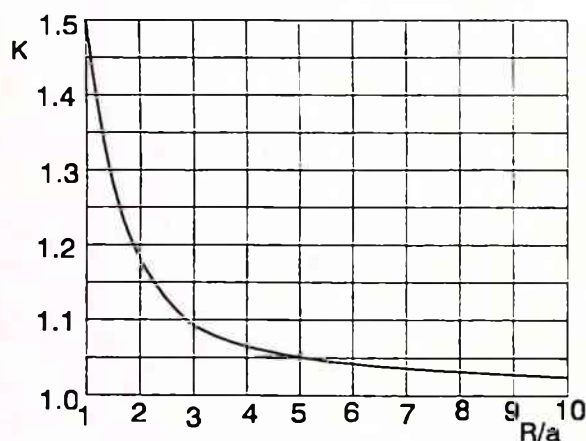
$$F = \pi k (2Ra - a^2) \ln \frac{2R}{2R - a}, \quad (3.85)$$

odakle se dobija deformacioni otpor u obliku:

$$k = \frac{F}{\pi (2Ra - a^2) \ln \frac{2R}{2R - a}}. \quad (3.86)$$

Jednačina (3.86) određuje napon tečenja materijala. Neophodni podaci za određivanje napona tečenja su: sila sabijanja F , poluprečnik a i radijus bočne konture R u srednjem presjeku cilindra.

Na Slici 3.16. predstavljena je promjena veličine popravnog koeficijenta kojim se koriguje napon tečenja (3.85) u srednjem presjeku za dobijanje stvarnih vrijednosti specifičnog deformacionog otpora za razne odnose R/a .



Slika 3.16. Popravni koeficijent kod UM

Metod je zasnovan na rešenju jednačina rasporeda napona u definisanom obrascu koji zadovoljava uslove ravnoteže, granične uslove, kriterijum tečenja i odnose *Levy-Mises*-a. Zbog toga je rešenje jednoznačno i tačnije od približnih rešenja dobijenih drugim metodama. Vrijednosti specifičnog deformacionog otpora dobijene datom metodom su bliske stvarnim vrijednostima. Metod je dosta jednostavan, a može se uspješno koristiti pri visokim temperaturama i brzinama deformisanja.

3.7.5. Metod jednoosnog zatezanja (MJZ)

Jedan od najjednostavnijih metoda za određivanje krivih ojačavanja je *metod jednoosnog zatezanja*. Zasnovan je na korišćenju rezultata eksperimenta jednoosnog zatezanja probne epruvete [91].

Glavna prednost ovog metoda jeste odsustvo trenja u toku procesa ispitivanja, tako da dobijeni rezultati vjerno odslikavaju naponsko deformaciono stanje u materijalu za vrijeme istezanja. Međutim, nedostatak ove metode jeste činjenica da se usled deformacionog ojačavanja metala, specifični deformacioni otpor može određivati samo do momenta dostizanja maksimalne zatežuće sile, tj. do početka lokalizacije deformacije. Na žalost, veličina deformacije koja

odgovara ovoj tački iznosi samo 20-30%, usled čega se tražena tačnost ne može dobiti u širokom intervalu. Iz tog razloga, da bi krive ojačavanja dobijene metodom jednoosnog zatezanja, mogle biti korišćene i za projektovanje tehnoloških postupaka plastičnim deformisanjem kod kojih se ostvaruju veći stepeni deformacije, neophodno je izvršiti aproksimaciju ovih krivih preko odgovarajućih analitičkih funkcija.

Pri konstrukciji krivih ojačavanja korišćenjem rezultata jednoosnog istezanja epruvete, osnovu čini dijagram nominalnog napona koji se dobija u toku eksperimenta i koji je definisan izrazom:

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0}, \quad (3.87)$$

i veze sa stvarnim naponom koji je definisan izrazom:

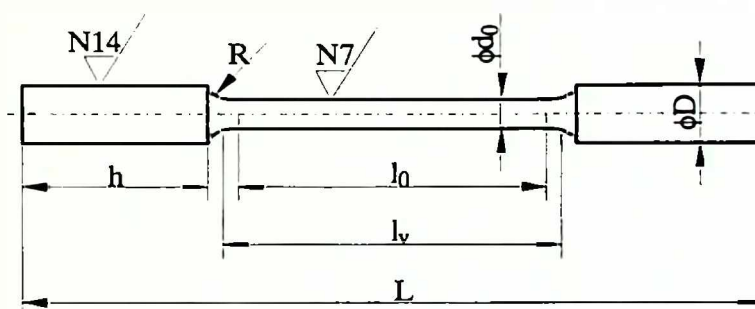
$$k = \frac{F}{A}. \quad (3.88)$$

Naime, sve do početka lokalizacije deformacije, odnosno dok u materijalu vlada jednoosno naponsko stanje, stvarni napon se na egzaktan način može izraziti preko nominalnog. Pomenuta veza se dobija korišćenjem uslova konstantnosti zapremine u toku procesa: $V = A_0 l_0 = A l = \text{const.}$ i glasi:

$$k = \frac{F}{A} = \sigma_0 \frac{A_0}{A} = \sigma_0 (1 + \varepsilon) = \frac{\sigma_0}{1 - \psi} = \sigma_0 e^\psi. \quad (3.89)$$

Unošenjem niza vrijednosti za stvarni napon dobijenih preko veze (3.88) u dijagram nominalnog napona i njihovim međusobnim spajanjem dolazi se do krive stvarnog napona. Ovako dobijena kriva predstavlja krivu ojačavanja.

Pripremak za ispitivanje metodom jednoosnog zatezanja je epruveta definisana standardom JUS C.A4.002 [41,119], data na Slici 3.17.



Slika 3.17. Epruveta za ispitivanje istezanjem prema JUS C.A4.002

3.8. METOD KONAČNIH ELEMENATA (MKE)

Najmoćniji, ali istovremeno i najkompleksniji numerički metod je *metod konačnih elemenata* - MKE (*Finite Element Method* - FEM), koji se pojavio krajem šesdesetih godina, ali zbog svoje kompleksnosti, širu primjenu je mogao doživjeti tek sa razvojem računarske tehnike. Ovaj metod spada u metode diskretne analize [65,101,124]. Za razliku od ostalih numeričkih metoda koje se zasnivaju na matematičkoj diskretizaciji jednačina, metod konačnih elemenata se zasniva na fizičkoj diskretizaciji objekta. Umjesto elemenata beskonačno malih dimenzija, posmatraju se djelovi objekta konačnih dimenzija - *konačni elementi*. Sa stanovišta fizičke interpretacije, to znači da se posmatrani objekat kao kontinuum sa beskonačno mnogo stepeni slobode, zamjenjuje diskretnim modelom međusobno povezanih konačnih elemenata, sa konačnim brojem stepeni slobode.

Sušтина aproksimacije kontinuuma po metodu konačnih elemenata se sastoji u sledećem:

1. posmatrani objekat se dijeli na određeni broj elemenata konačnih dimenzija koji čine mrežu konačnih elemenata.
2. konačni elementi su međusobno povezani u konačnom broju tačaka koje se nazivaju čvorovi.
3. stanje u svakom konačnom elementu (npr. polje pomjeranja, deformacija, napona) opisuje se pomoću interpolacionih funkcija i konačnog broja parametara u čvorovima, koji predstavljaju osnovne nepoznate veličine i
4. za analizu i proračun sistema konačnih elemenata važe svi principi i postupci koji važe za klasične diskretne sisteme.

Rešavanje problema mehanike kontinuuma po metodi konačnih elemenata se svodi na tzv. proces *korak po korak* (*Step by Step Process*) [20,49] što je bilo pogodno za intenzivno korišćenje računara, pa je ova metoda i dobila na značaju pojavom i razvojem računara i računarskih sistema. U tom procesu izdvaja se šest najvažnijih koraka:

1. diskretizacija kontinuuma.
2. izbor interpolacionih funkcija.
3. sračunavanje karakteristika elemenata.
4. formiranje jednačina mreže konačnih elemenata.
5. rešavanje sistema jednačina i
6. proračun potrebnih uticaja.

Od navedenih šest koraka, prva tri su naročito važna. Poslednja tri koraka, iako su od velikog značaja, danas su toliko razvijena da spadaju u okvire rutinskog posla koji je prilagođen automatskom radu na računaru.

Prema načinu na koji se formulišu osnovne jednačine metoda konačnih elemenata postoje četiri osnovna vida MKE:

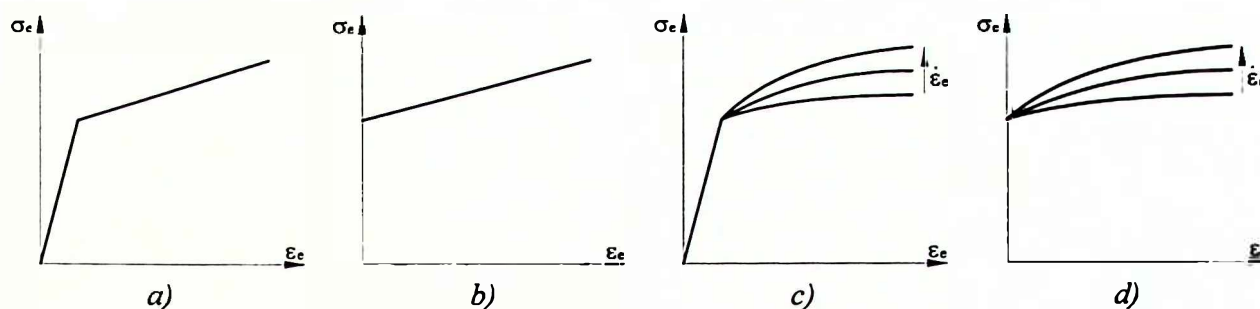
1. *Direktni metod* (*Direct Finite Element Method*) je analogan metodu deformacije u proračunu linijskih nosača i koristi se samo za jednostavnije probleme.
2. *Varijacioni metod* (*Variational Finite Element Method*) se zasniva na principu stacionarnosti funkcionala. Ovaj metod može se primijeniti i na složene objekte.
3. *Metod reziduuma* (*Residual Finite Element Method*) je opšti vid aproksimacije koji se zasniva na diferencijalnim jednačinama stanja posmatranog objekta.
4. *Metod energetskog balansa* (*Energy Balance Finite Element Method*) se zasniva na balansu različitih vidova energije i ima primjenu u termostatičkoj i termodinamičkoj analizi kontinuuma.

Od navedenih metoda u mehanici deformabilnog tijela, najveći značaj ima varijacioni metod i metoda reziduuma.

Metodom konačnih elemenata se može rešavati veći broj problema iz različitih oblasti. Poslednjih godina naročito je karakterističan po razvoju i primjeni u različitim oblastima nelinearne mehanike kontinuuma, kao što su geometrijska i materijalna nelinearnost, dinamika konstrukcija, termodinamika, mehanika fluida, propagacije talasa, termičke obrade i dr. Svakako, sa aspekta ove disertacije, najinteresantnija primjena ove metode je u oblasti obrade deformisanjem kod koje je izražena velika geometrijska i materijalna nelinearnost. U zavisnosti od modela materijalne nelinearnosti razlikuju se četiri vida metoda konačnih elemenata [49]:

1. *Kruto-plastični MKE* (*Rigid-plastic FEM*),
2. *Kruto-viskoplastični MKE* (*Rigid-viscoplastic FEM*),
3. *Elasto-plastični MKE* (*Elastic-plastic FEM*) i
4. *Elasto-viskoplastični MKE* (*Elastic-viscoplastic FEM*).

Način interpretacije materijalne nelinearnosti MKE je dat na Slici 3.18.



Slika 3.18. Različiti tipovi materijalne nelinearnosti:

a) Elasto-plastični, b) Kruto-plastični, c) Elasto-viskoplastični, d) Kruto-viskoplastični

S druge strane, sa aspekta ponašanja materijala pri deformisanju postoje dvije formulacije metode konačnih elemenata, a to su:

1. Strukturna formulacija (*Structural Formulation*) koja analizira čvrsto deformabilno tijelo i
2. Formulacija tečenja (*Flow Formulation*).

Prva formulacija uzima materijalnu nelinearnost u obliku datom na slici 3.18. pod (a) i (b), dok druga na istoj slici pod (c) i (d).

Kako se u ovom radu metod konačnih elemenata koristi u okviru numeričke simulacije pomoću gotovog softverskog paketa DEFORM, po principu "crne kutije" ("Black box"), to se neće ulaziti u matematičke osnove ovog metoda.

3.9. NUMERIČKA SIMULACIJA

Pojam *numerička simulacija* procesa deformisanja se odnosi na modeliranje procesa nekim numeričkim metodom, u prvom redu metodom konačnih elemenata, na računaru. Numeričkom simulacijom je moguće, na osnovu sledećih ulaznih podataka:

- geometrijski parametri priprema i obradka,
- kontaktni uslovi definisani preko koeficijenta/faktora trenja,
- karakteristika materijala definisanih preko krivih ojačavanja,
- termodinamičkih parametara kod tople obrade i
- brzinskih parametara izraženih preko brzine kretanja pokretnih delova alatnih mašina za obradu deformisanjem,

izvršiti kompletnu naponsko deformacionu analizu deformisanja. Takođe je moguće vršiti analize mikrostrukture kod termičke obrade.

Najvažniji izlazni parametri koji se mogu dobiti numeričkom simulacijom su:

- promjena geometrije i dobra vizuelizacija samog procesa deformisanja,
- distribucija napona, deformacija, brzina deformacija, brzina pomjeranja, temperature,
- promjena deformacione sile tokom odvijanja procesa deformisanja
- energetski transfer,
- opterećenje alata i radne mašine.

Postoji veliki broj radova koji se bave kako razvojem, unapređenjem i ocjenom postojećih alata za numeričku simulaciju procesa, tako i analizama raznih procesa deformisanja pomoću numeričke simulacije. U radu [3] autor ističe ciljeve numeričke simulacije sa aspekta praktične primjene koji su podijeljeni u dvije grupe:

1. Unapređenje projektovanja alata i utvrđivanje parametara procesa deformisanja posredstvom:
 - određivanja tečenja metala i konačnih dimenzija gotovog dijela,
 - prevencije defekata koji mogu nastati tokom obrade,
 - simulacije procesa radi utvrđivanja popunjavanja gravure i
 - određivanje temperature alata i materijala u procesima tople obrade radi kontrolisanja kontaktnog trenja, osobina obradka i vijeka alata.
2. Poboljšanje kvaliteta gotovog obradka uz smanjenje troškova proizvodnje, posredstvom:
 - predviđanja mikrostrukture i kontrole veličine zrna,
 - smanjenja neuspjelih pokušaja u proizvodnji i glavnog vremena izrade i
 - smanjenja škarta i poboljšanja tečenja materijala u toku obrade.

U svijetu postoji više razvijenih softverskih paketa za numeričke simulacije procesa deformisanja. Ipak, zbog istaknute kompleksnosti problema deformisanja i samog metoda konačnih elemenata, tu nije u pitanju preveliki broj paketa, kao što je to slučaj iz nekih drugih oblasti nauke, pa čak i deformacije elastičnog tijela. Pregled važnijih postojećih softverskih paketa za numeričku simulaciju procesa deformisanja dat je u Tabeli 3.1. [1,25,50,75,94].

Jedan od najboljih programskih paketa za numeričku FEM simulaciju procesa deformisanja je DEFORM paket, za čiji dio (DEFORM 2D I DEFORM 3D) Mašinski fakultet u Podgorici posjeduje licencu i koji će se koristiti za numeričke simulacije u ovoj Disertaciji, pa će iz tog razloga biti detaljnije obrađen.

Tabela 3.1. Programski paketi za numeričku simulaciju procesa deformisanja

Programski paket	2D/3D	"Developer"
DEFORM DEFORM-2D DEFORM-3D DEFORM-PC DEFORM-PC Pro DEFORM-HT	2D 3D 2D 2D 2D/3D	Scientific Forming Technology Corporation 5038 Reed Road Columbus Ohio 43220-2514, USA Email: SFTC@compuserve.com WEB: www.deform.com
CAMPform CAMPform 2D CAMPform 3D CAMPmold CAMPxpert	2D 3D 2D 2D	Computer Aided Materials Processing Laboratory Department of Mechanical Engineering Korea Advanced Institute of Science and Technology ME3227.373-1 Kusong-dong, Zusong-gu Taejon 305-701 - Korea E-mail: freezer@imp.kaist.ac.kr
CAPS-Finel EESY-2-FORM EESY-FORM	2D 2D 3D	CMP Gesellschaft für Computeranwendung Proceß- und Materialtechnik mbH Kaiserstraße 100 Horzogenraht D-52134 Germany E-mail: cpm-gmbh@t-online.de
FORGE FORGE 2 PCFORGE FORGE3 FORGE3 PC	2D 2D 3D 3D	Transvalor SA Les Espaces Delta BP 037 Sphia Antipoliy Cedex, France E-mail: 100604.2665@compuserve.com WEB: www.transvalor.com
MARC AUTOFORGE	2D/3D	MARC Analysis Research Corporation 260 Sheridan Avenue Palo Alta CA 94306 - USA E-mail: autoforge@marc.com WEB: www.marc.com

Tabela 3.1. Programski paketi za numeričku simulaciju procesa deformisanja (nastavak)

Programski paket	2D/3D	"Developer"
MSC Superforge	3D 2D	Technical Project Coordinator MacNeal-Schwendler (E.D.C.) B.V. Groningenweg 6 2803 PV Gouuda - Netherlands E-mail: wim.slagter@macsch.com WEB: www.macsch.com
Qform	2D/3D	Quantor Ltd. P.O. Box 39 117049 Moskow - Russia E-mail: inform@quantor.com WEB: www.quantor.com
ABACUS	2D	ABAQUS, Inc. Rising Sun Mills 166 Valley Street Providence, RI 02909-2499 E/mail: info@abaqus.com WEB: www.abaqus.com

3.9.1. DEFORM softverski paket

Ko što se vidi iz Tabele 3.1. DEFORM paket se sastoji iz više djelova [25].

DEFORM 2D je moguće koristiti na UNIX platformama (HP, SGI, SUN, DEC, IBM), ali i na personalnim kompjuterima sa Windows-NT/2000 operativnim sistemom. Moguće je modelirati 2D ravanske i osnosimetrične probleme. Sadrži najnovije inovacije u modeliranju metodom konačnih elemenata koji se podjednako dobro mogu primijeniti u proizvodnoj ili istraživačkoj okolini.

DEFORM 3D je takođe moguće koristiti na UNIX platformama (HP, SGI, SUN, DEC, IBM), ali i na personalnim kompjuterima sa Windows-NT/2000 operativnim sistemom. Moguće je modelirati tečenje kod kompleksnih trodimenzionalnih problema koji se ne mogu svesti na 2D modele.

DEFORM PC primjenjuje se na personalnim kompjuterima sa Windows 95, 98, ili NT/2000 operativnim sistemom. Koristi se za 2D osnosimetrične i ravanske probleme male i srednje kompleksnosti.

DEFORM PC Pro se takođe primjenjuje na personalnim kompjuterima sa Windows 95, 98, ili NT/2000 operativnim sistemom. Ovaj segment je moćan za dvodimenzionalno modeliranje i sadrži veći dio mogućnosti koje posjeduje DEFORM 2D.

DEFORM-HT je dodatak za DEFORM-2D i DEFORM-3D/2000 i pomoću njega se mogu modelirati efekti termičke obrade uključujući tvrdoću i mikrostrukturu djelova zapremine.

DEFORM paket ima velike mogućnosti u procesima deformisanja:

- Zajedničko modeliranje deformisanja i toplotnog transfera u hladnim i toplim procesima (svi segmenti).
- Široku bazu podataka karakteristika materijala i legura uključujući legure čelika, aluminijuma, titanijuma i super legure (svi segmenti).
- Unošenje podataka materijala, koji nijesu dati bazi podataka, od strane korisnika (svi segmenti).
- Daje informacije o tečenju materijala, popunjavanju kalupa, sili deformisanja, naponima u alatu, formiranju defekata i duktilnom lomu (svi segmenti).

- Korišćenje krutih, elastičnih i termo viskoplastičnih modela, koji su pogodni za modeliranje velikih deformacija (svi segmenti).
- Modeliranje deformisanja poroznih materijala kao što su proizvodi metalurgije praha (-2D, -3D, -Pro segmenti).
- Korišćenje elasto-plastičnog modela za modeliranje zaostalih napona (-2D, -3D, -Pro segmenti).
- Posjeduje integrisane modele za opremu - hidraulične prese, čekiče, prese sa zavojnim vretenom i mehaničke prese (svi segmenti).
- Korišćenje korisnički definisanih *subroutine*-a za modeliranje materijala, presa, kriterijuma loma i drugih funkcija (-2D i -3D segmenti).
- Promjenu mreže (-2D, -3D, -Pro segmenti) i praćenje promjene važnih informacija tečenja materijala za određenu tačku (svi segmenti).
- Conturni (linijski i osjenčeni) prikaz temperature, deformacija, napona, oštećenja i drugih promjenljivih (svi segmenti).
- Definisanje kontaktnih graničnih uslova i automatski remeshing što omogućava nastavak simulacije do kompletiranja (-2D, -Pro segmenti).
- Višestruko deformabilno tijelo omogućava analizu više obradaka ili zajedničku analizu kalupa (-2D, -3D, -Pro segmenti).
- Modeli nastanka i propagacije pukotine zasnovani na faktorima oštećenja omogućuju modeliranje smicanja, prosijecanja, probijanja i rezanja (-2D).

3.9.2. DEFORM-2D v. 7.20 sistem

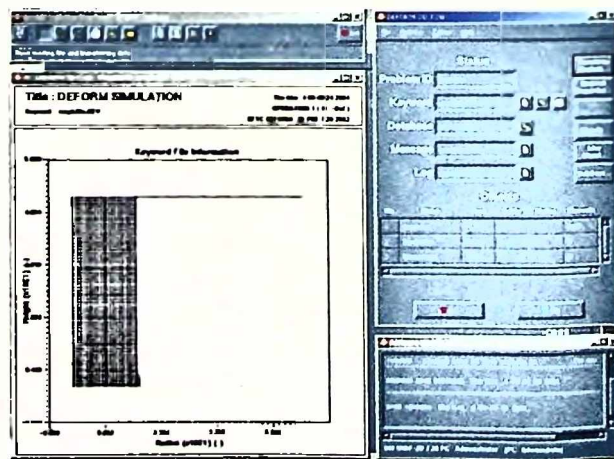
S obzirom da se u radu obrađuju osnosimetrični problemi, to će se koristiti DEFORM-2D za numeričku simulaciju procesa deformisanja, pa iz tog razloga ovaj dio DEFORM paketa biće detaljnije obrađen.

DEFORM-2D se sastoji od tri glavna modula (Slika 3.19.):

1. Pre-processor,
2. Simulation engine i
3. Post-procesor



Slika 3.19. Glavni "interface" DEFORM-2D sistema



Slika 3.20. Pre-processor DEFORM-2D sistema

Pre-processor koristi grafički korisnički interface za sastavljanje baze podataka neophodnih za odvijanje numeričke simulacije (Slika 3.20.). Ovaj modul se sastoji iz više segmenata:

- *Simulation controls* - uključuje instrukcije kada DEFORM-2D treba da završi simulaciju, šta treba biti modelirano, koliko koraka treba napraviti prilikom diskretizacije procesa i koji će se koraci sačuvati i dr.
- *Material properties* - uključuje podatke koje opisuju ponašanje materijala tokom procesa. Ti podaci su:

- Elastični:

- Jungov modul elastičnosti,
- Poasonov odnos i
- Koeficijent termičkog širenja;

- Plastični - izraženi preko krive ojačavanja koja može biti zadata jednim od sledećih oblika [30]:

- Unošenjem na osnovu eksperimentalnih podataka

$$k = k(\varphi, \dot{\varphi}, T). \quad (3.90)$$

- Eksponecijalni zakon [31]:

$$k = k_0 + c\varphi^n \dot{\varphi}^m, \quad (3.91)$$

gdje su:

c - konstanta materijala,

n - eksponent deformacije i

m - eksponent brzine deformacije.

- Napon tečenja aluminijumskih legura - tip 1 [25,98]:

$$\dot{\varphi} = A[\sinh(\alpha k)]^n e^{\frac{\Delta H}{RT_{abs}}}, \quad (3.92)$$

gdje su:

A - konstanta,

α - konstanta,

n - eksponent brzine deformacije,

$\Delta H \left[\frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right]$ - aktivaciona energija,

$R \left[\frac{\text{kJ}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$ - univerzalna gasna konstanta,

$T_{abs} [\text{K}]$ - apsolutna temperatura.

- Napon tečenja aluminijumskih legura - tip 2 [21,25]:

$$\dot{\varphi} = A k^n e^{\frac{\Delta H}{RT_{abs}}}. \quad (3.93)$$

- Linearno ojačavanje:

$$k = Y(T, A) + H(T, A)\varphi, \quad (3.94)$$

gdje su:

Y - inicijalni napon tečenja,

A - atomski sadržaj,

H - konstanta deformacionog ojačavanja.

- Termički podaci:

- Termička provodljivost,
- Toplotni kapacitet i
- Emisivnost.

- *Objects* - uključuju sve podatke vezano za objekte koji učestvuju u procesu, a to su:
 - geometrija objekata - obradka, alata,
 - mreža obradka,
 - temperatura,
 - pomjeranje pokretnih objekata - djelova alata,
 - definisanje čvorova mreže na koje će se primijeniti granični uslovi.

Geometrija objekata se može unijeti na tri načina i to:

- u XYR - formatu,
- "Line-Arc" - formatu i
- preko .GEO file-a koji sadrži podatke o tačkama i lukovima objekata.

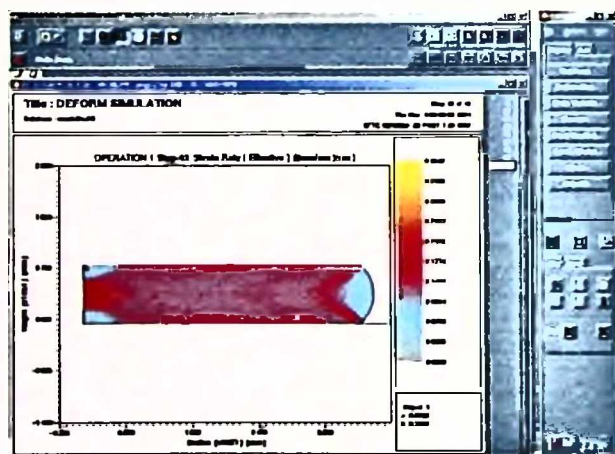
Mreža se generiše pomoću posebnog modula koji se naziva *Automatic Mesh Generator (AMG)* i to:

- sistemski i
- od strane korisnika.

Ovdje se postavljaju i *Remeshing* kriterijumi.

- *Inter objects* - definišu se uslovi među objekatima koji su u interakciji jedan sa drugim, u prvom redu preko kontaktnog trenja i toplotnog transfera između objekata. Trenje može biti definisano po jednom od tri modela opisana u Tački 3.6.
- *Database generation* - generiše inicijalnu bazu podataka.

Simulation engine - jeste modul u kome se vrše matematički proračuni koji se zahtijevaju u numeričkoj simulaciji na osnovu inicijalne baze podataka. Ovaj modul automatski aktivira AMG modul kod *remeshing*-a kada se za to ukaže potreba i kompletira baza podataka.



Slika 3.21. Post-processor DEFORM-2D sistema

Post-processor omogućuje grafički pregled i "izvlačenje" numeričkih podataka dobijenih iz prethodnog modula. Svi rezultati sačuvanih koraka u bazi podataka su dostupni u ovom modulu. Ovi rezultati uključuju:

- deformisanu geometriju i pomjeranje alata i deformisane mreže,
- konturne dijagrame - linijske ili osjenčene, koji prikazuju distribuciju neke promjenljive stanja kao što su naponi, deformacije, brzine deformacija, oštećenja i dr.
- vektorsko crtanje pomjeranja, brzina pomjeranja, koja pokazuju intenzitet, pravac i smjer pomjeranja za svaki čvor mreže,

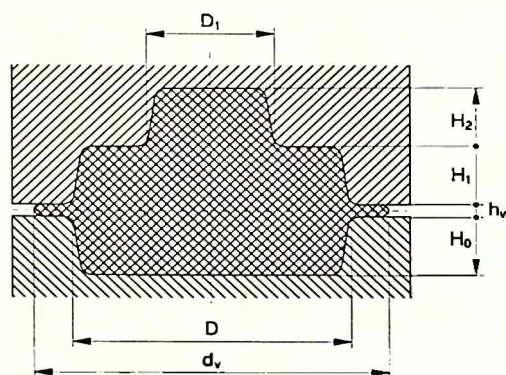
- grafike ključnih promjenljivih kao što su opterećenje prese ili praćenje promjene neke veličine u datoj tački,
 - praćenje promjene mreže koja dobro predstavlja tečenje materijala za uniformnu mrežu.
- Stanje promjenljivih i slike se mogu sačuvati u digitalnom ili neutralnom formatu koji se mogu koristiti u drugim programima.

4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

4.1. DEFINICIJA EKSPERIMENTA

Analiza naponsko deformacionog stanja obradka pri zapreminskom deformisanju u otvorenim kalupima, ima za cilj istraživanje zavisnosti svih relevantnih parametara u funkciji ulaznih faktora. Modeliranjem tečenja metala, određuju se funkcionalne zavisnosti veličina koje determinišu proces deformisanja, kao što su: pomjeranja, deformacije, brzine pomjeranja, brzine deformacija, naponi.

Proces zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima je jedan od najsloženijih procesa sa stanovišta istraživanja i analize naponsko deformacionog stanja, u okviru kojeg postoji velika raznovrsnost u pogledu korišćenih materijala i oblika. Iz tog razloga, istraživanja su konkretizovana na familiji stepenastih osnosimetričnih komada.



Slika 4.1. Obradak u zahvatu sa kalupom

Usvojena su dva nivoa visine sa gornje i jedan nivo visine sa donje strane podione ravni kalupa (Slika 4.1). Postoje sledeće zone meridijalnog presjeka obradka:

1. zona donjeg kalupa (H_0),
2. zona vijenca (h_v),
3. zona prvog nivoa gornjeg kalupa (H_1) i
4. zona drugog nivoa gornjeg kalupa (H_2).

Istraživanja se izvode u laboratorijskim uslovima i podešavaju se tako da budu što sličniji realnim (proizvodnim) uslovima koji vladaju u neposrednom industrijskom okruženju. Usvajaju se sledeći uslovi istraživanja naponsko deformacionog stanja obradka kod zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima:

1. Kao ispitivani materijal koristi se legura aluminijuma AlMgSi0,5 koja se veoma često koristi u procesima zapreminske obrade deformisanjem, prije svih u procesima istiskivanja i deformisanja u otvorenim kalupima.
2. Ispitivanje se vrši na temperaturama tople obrade navedene legure, tj. u intervalu $t=(420\div 460)$ [°C].
3. Deformisanje se ostvaruje konstantnom brzinom deformisanja: $v=2$ [mm/s].
4. Proces se ostvaruje sa podmazivanjem grafitnom mašću, koja se primenjuje i u proizvodnim uslovima.

Eksperimentalna istraživanja su koncipirana tako da se izvode u tri faze:

1. *Prva faza* - Određivanje koeficijenta/faktora trenja za definisanje kontaktnih uslova za sve konkretne uslove istraživanja.
2. *Druga faza* - Određivanje specifičnog deformacionog otpora u vidu krivih ojačavanja, za sve konkretne uslove istraživanja, koji zajedno sa koeficijentom/faktorom trenja predstavljaju osnovne ulazne parametre modeliranja u obradi deformisanjem.
3. *Treća faza* - Određivanje naponsko deformacionog parametara obradka kod procesa deformisanja u otvorenim kalupima.

4.2. PLAN EKSPERIMENTA

Da bi se mogao postaviti plan eksperimenta, izvršena su obimna preliminarna ispitivanja, na osnovu kojih je odabran plan eksperimenta i ulazni faktori na osnovu kojih će se pratiti izlazne veličine.

Za plan eksperimenta usvaja se potpuni višefaktorni ortogonalni plan sa variranjem faktora na dva nivoa [109,120]. Usvaja se sistem ponavljanja u centralnoj tački plana $n_0=4$ puta. Broj eksperimentalnih tačaka za broj faktora k sa brojem ponavljanja u centralnoj tački n_0 je:

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

4.2.1. Matrica plana eksperimenta

Prije početka mjerenja izlazne veličine (y), usvajaju se granice intervala varijacije tako da kod ortogonalnog plana mora biti zadovoljen uslov:

$$X_{0i}^2 = X_{gi} \cdot X_{di}, i = 1, 2, \dots, k. \quad (4.2)$$

Nivoi i -tog faktora kodiraju se preko jednačina transformacije:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{w_i}, i = 1, 2, \dots, k, \quad (4.3)$$

gdje su:

X_i - prirodna vrijednost i -tog faktora,

X_{0i} - vrijednost i -tog faktora na osnovnom nivou i

w_i - interval varijacije faktora X_i , čija je brojna vrijednost jednaka razlici gornjeg i osnovnog nivoa, odnosno osnovnog i donjeg nivoa.

Matrica plana eksperimenta data je u Tabeli 4.1.

4.2.2. Ulazni faktori

Kao ulazne veličine (nezavisno promjenljive - faktori) usvajaju se geometrijski faktori kalupa (Slika 4.1.) i priprema, radna temperatura, faktor trenja i napon tečenja. Ulazni faktori koji se uzimaju u obzir su:

- *Geometrijski faktori kalupa* koji se radi opštosti rezultata izražavaju bezdimenzionim odnosima karakterističnih dimenzija kalupa i osnovnog prečnika kalupa D :

$$X_1 = \frac{H_1}{D}, \quad X_2 = \frac{H_2}{D}, \quad X_3 = \frac{D_1}{D}, \quad (4.4)$$

gdje su :

H_1 - visina prvog nivoa gornjeg kalupa,

H_2 - visina drugog nivoa gornjeg kalupa,

D_1 - prečnik drugog nivoa gornjeg kalupa i

D - osnovni prečnik kalupa.

- *Faktor geometrije priprema* je odnos početnog prečnika priprema i osnovnog prečnika kalupa:

$$X_4 = \frac{d_0}{D}, \quad (4.5)$$

gdje je:

d_0 - prečnik priprema.

- *Faktor temperature* je faktor koji se uzima u obzir kod tople obrade i predstavlja radnu temperaturu u *Celsius*-ovim stepenima:

$$X_5 = t [^{\circ}\text{C}]. \quad (4.6)$$

Tabela 4.1. Plan matrica višefaktornog ortogonalnog plana

Potpuni ortogonalni plan tipa:				Eksperimentalna tačka	Ulazni faktori x						Vektor izlaza y
					x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	...	x _k	
2 ^k	...	2 ³	2 ²	1	+1	-1	-1	-1	...	-1	y ₁
				2	+1	+1	-1	-1	...	-1	y ₂
				3	+1	-1	+1	-1	...	-1	y ₃
				4	+1	+1	+1	-1	...	-1	y ₄
				5	+1	-1	-1	+1	...	-1	y ₅
				6	+1	+1	-1	+1	...	-1	y ₆
				7	+1	-1	+1	+1	...	-1	y ₇
				8	+1	+1	+1	+1	...	-1	y ₈
				⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
				2 _k	+1	+1	+1	+1	...	+1	y _{2^k}
Centralne tačke plana				2 _{k+1}	+1	0	0	0	...	0	y _{2^k+1}
				2 _{k+2}	+1	0	0	0	...	0	y _{2^k+2}
				2 _{k+3}	+1	0	0	0	...	0	y _{2^k+3}
				2 _{k+4}	+1	0	0	0	...	0	y _{2^k+4}
Koeficijenti višestruke regresije					b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	...	b _k	
Osnovni nivo						X ₀₁	X ₀₂	X ₀₃	...	X _{0k}	
Interval varijacije						w ₁	w ₂	w ₃		w _k	
Gornji nivo						X _{g1}	X _{g2}	X _{g3}		X _{gk}	
Donji nivo						X _{d1}	X _{d2}	X _{d3}		X _{dk}	

Uzimajući u obzir uslov (4.2), usvojeni su nivoi varijacije pojedinih ulaznih faktora, i dati u Tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Nivoi varijacije ulaznih faktora plana eksperimenta

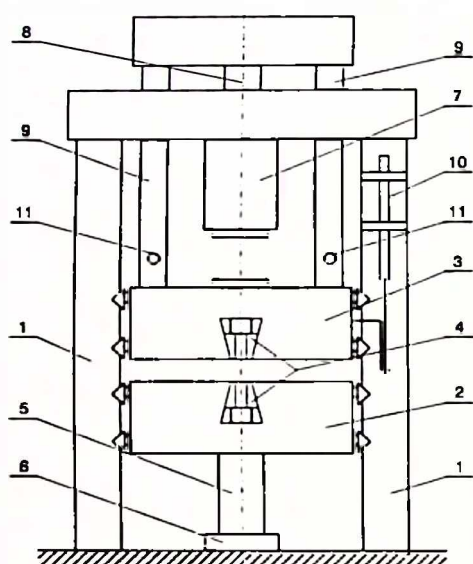
Ulazni faktori	Donji nivo	Osnovni nivo	Gornji nivo
X_1	0.175	0.250	0.357
X_2	0.150	0.250	0.417
X_3	0.417	0.500	0.600
X_4	0.757	0.839	0.908
$X_5 [^{\circ}\text{C}]$	420	440	460

Usvajaju se sledeće vrijednosti ostalih dimenzija obradka i kalupa (Slika 4.1.):

- Osnovni prečnik kalupa: $D=40$ [mm];
- Visina vijenca odpreska: $h_v=1$ [mm];
- Prečnik vijenca: $d_v=50$ [mm];
- Visina donjeg kalupa: $H_0=10$ [mm].

4.3. EKSPERIMENTALNA OPREMA

U eksperimentalnim istraživanjima ove Disertacije, kao mašina za deformisanje korišćena je mašina za statička ispitivanja sa hidrauličnim pogonom, tipa R100, ruske proizvodnje, na kojoj je moguće vršiti ispitivanja na istezanje i pritisak - tj. koristiti je kao kidalicu ili kao presu (Slika 4.2. i Slika 4.3.) (u daljem tekstu "*presa*"). Za ispitivanje istezanjem koriste se hidraulične stezne čeljusti (4) u donjem (2) i gornjem (3) stolu, a ispitivanje na pritisak se ostvaruje između gornjeg stola prese i dna hidrauličnog cilindra (7). Presu je moguće koristiti kako za izvođenje procesa zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima i slobodnog sabijanja, tako i za proces istosmjernog istiskivanja.



Slika 4.2. Hidraulična presa: 1 - noseći stubovi, 2 - donji sto, 3 - gornji sto, 4 - stezne čeljusti, 5 - zavojno vreteno za pozicioniranje donjeg stola, 6 - navrtka, 7 - hidraulični cilindar, 8 - hidraulični klip, 9 - nosači gornjeg stola, 10 - induktivni davač hoda, 11 - davači sile

Tehnički podaci peći su:

- priključni napon: 220 [V],
- spoljašnje dimenzije: 550×650×630 [mm]
- dimenzije radnog prostora: 200×100×260 [mm],
- snaga grijača: 350 [kW],
- maksimalna radna temperatura: 1200 [°C],
- težina: 100 [daN].

Za izradu pripremak, korišćene su sledeće mašine za obradu metala rezanjem:

- univerzalni strug tipa: US 400 - Alatne mašini, Skoplje (u daljem tekstu "*strug*"),
- univerzalna glodalica tipa: FGU 32 - Alatne mašini, Skoplje (u daljem tekstu "*glodalica*"),
- univerzalna brusilica tipa: 40LN - Majeveca (u daljem tekstu "*brusilica*"),
- tračna testera tipa: UD 210 - "Pobeda", Novi Sad.

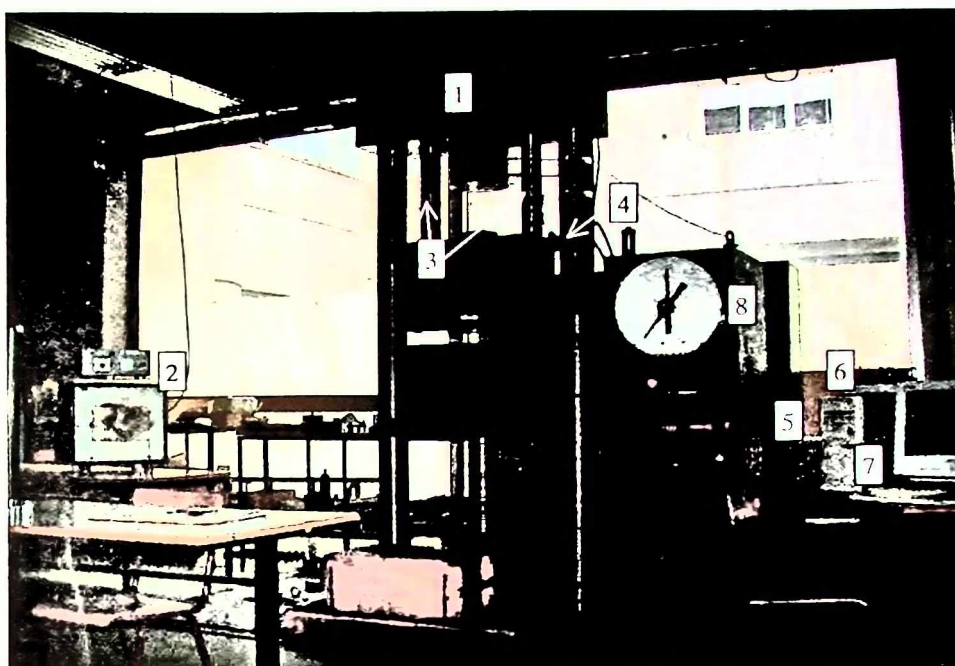
Istraživačko mesto i navedena oprema nalaze se u Laboratoriji Instituta Mašinskog fakulteta u Podgorici

Tehnički podaci prese su:

- maksimalno opterećenje: 1 [MN],
- maksimalna brzina kretanja radnog stola: $v=2$ [mm/s],
- dužina: 2976 [mm],
- širina: 1930 [mm],
- visina: 4232 [mm],
- masa mašine 7186 [kg],
- prečnik radnog cilindra 225 [mm].

Kako je konceptom istraživanja usvojeno modeliranje deformisanja legure aluminijuma u otvorenim kalupima u toplom stanju, za zagrijavanje pripremak do radne temperature, korišćena je laboratorijska peć za zagrijavanje i termičku obradu (u daljem tekstu "*peć*") tipa LP 08 domaće proizvodnje (Slika 4.3.).

Radni prostor peći izrađen je od vatrostalnog materijala, a spoljni oklop od čeličnog lima, koji je zaštićen sintetičkim lakom. Regulacija radne temperature peći vrši se preciznim programatorom.



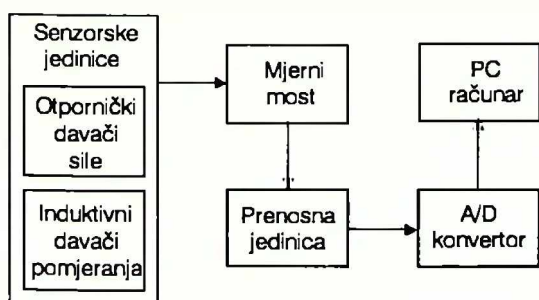
Slika 4.3. Fotografija istraživačkog mjesta: 1 - hidraulična presa, 2 - laboratorijska peć, 3 - otpornički davači sile, 4 - induktivni davač hoda, 5 - mjerni most, 6 - prenosna jedinica, 7 - računar sa A/D karticom, 8 - mjerno regulacioni uređaj prese

4.4. MJERNA OPREMA

Mjerenja pri navedenim eksperimentalnim istraživanjima su vršena pomoću precizne analogno digitalne mjerne opreme povezane u informacijski mjerni sistem, koji se sastoji od:

- senzorskih jedinica:
 - mjernih traka tipa: HBM 6/120LY11,
 - induktivnog davača pomjeranja tipa: HBM W 200K,
- mjernog mosta tipa: HBM KWS.637.D4,
- prenosne jedinice,
- A/D kartice tipa: DT 2801-A i
- računara tipa: PENTIUM I.

Mjerni sistem je predstavljen blok dijagramom na Slici 4.4. [14,110].



Slika 4.4. Blok dijagram informacionog mjernog sistema

Signal sa senzorskih jedinica (senzora, davača) je pojačavan u digitalnom šestokanalnom mjernom mostu (5). Izlazni analogni signal iz mosta, prenosnom jedinicom (6) se dovodi do AD/DA kartice, konvertuje u digitalni i memoriše na personalnom računaru (7) sa instalisanim softverskim paketom za akviziciju podataka GLOBAL-LAB.

Kontrola temperature vršena je pomoću digitalnog termometra za mjerenje temperature na površini tvrdih materijala, tipa: DT IM Dalmacija. Termometar je sa taktilnom sondom, napravljenom na bazi termopara.

Za kontrolu dužina korišćeno je kljunasto mjerilo sa nonijusom i mikrometar.

4.4.1. Davači sile i hoda prese

Otpornički davači radne sile prese su mjerne trake povezane u puni Vitston-ov most (Slika 4.2.-11 i Slika 4.3.-3), koji daju promjenu električnog signala na osnovu elastične deformacije nosača gornjeg stola prese (9) (Slika 4.2.). Korišćene mjerne trake su otpornosti $120[\Omega] \pm 0.2\%$ i k-faktora $2.05 \pm 1\%$.

Induktivni davač hoda prese (Slika 4.2.-10 i Slika 4.3.-4) je mjernog opsega ± 200 [mm].

4.4.2. Baždarenje mjerne opreme

Baždarenje otporničkih davača sile na nosećim stubovima gornjeg stola prese je vršeno u odnosu na k-faktor mjernih traka koje su povezane u pune Vitstonov-e mostove, pri čemu su dvije aktivne (daju protivuvrijednost deformacije nosača gornjeg stola prese), a dvije kompenzacione (koje neutrališu uticaj promjene temperature okoline na tačnost mjerenja).

Polazi se od izraza za promjenu otpora na otporničkom davaču u obliku punog mosta [14,123]:

$$\frac{U_d}{U_e} \left[\frac{\text{mV}}{\text{V}} \right] = \frac{n}{4} k \cdot \epsilon, \quad (4.7)$$

gdje su:

U_d - promjena napona davača usled deformacije mjernih traka,

U_e - napon napajanja davača,

$n=2$ - broj aktivnih mjernih traka u mostu,

ϵ - deformacija.

Napon se pri linijskoj elastičnoj deformaciji može izraziti:

$$\sigma = E \cdot \epsilon = \frac{4F}{d^2 \pi}, \quad (4.8)$$

gdje su:

$E=2.1 \cdot 10^{-4}$ [kN/cm²] - moduo elastičnosti,

d - prečnik nosača gornjeg stola.

Na osnovu jednačine (4.8) deformacija se može izraziti kao:

$$\epsilon = \frac{4F}{E \cdot d^2 \cdot \pi}. \quad (4.9)$$

Uvrštavanjem (4.9) u (4.8) dobija se izraz:

$$F = \frac{U_d}{U_e} \frac{E \cdot d^2 \cdot \pi}{n \cdot k}, \quad (4.10)$$

pomoću kojeg se određuje vrijednost sile u funkciji promjene napona na davaču, prečnika nosećeg stuba gornjeg stola prese i k-faktora mjernih traka povezanih u puni most.

Tačnost mjerenja zavisi prvenstveno do greške k-faktora koja iznosi 1% (Tačka 4.4.1.) i od tačnosti mjernog mosta. Vrijednosti sile nakon baždarenja su pokazale visok stepen saglasnosti ($100\% \pm 1\%$) sa vrijednostima dobijenim elastičnim deformisanjem piezodavača sile, a takođe sa vrijednostima dobijenim sa hidrauličkog mjernog uređaja prese ($100\% \pm 1.5\%$) (Slika 4.3.-8).

Baždarenje induktivnog davača hoda prese (Slika 4.2.-10), je vršeno pomoću kljunastog mjerila tačnosti mjerenja od 0.01 [mm].

4.5. ALATI ZA OBRADU DEFORMISANJEM

U sklopu eksperimentalnih istraživanja u ovom radu korišćeni su sledeći alati za obradu deformisanjem:

1. alati za istosmjerno istiskivanje punih profila,
2. alati za deformisanje u otvorenim kalupima i
3. alati za slobodno sabijanje.

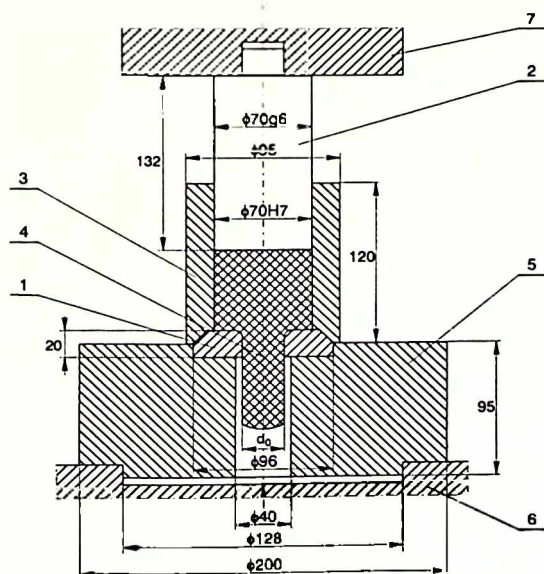
4.5.1. Alati za istosmjerno istiskivanje punih profila

Sklop alata za istosmjerno istiskivanje okruglih profila se koristi za dobijanje olovnih šipki odgovarajućeg prečnika (Slika 4.5.) [143,146]. Svi elementi sklopa alata za istosmjerno istiskivanje su izrađeni od materijala Č.1530, osim držača matrice koji je izrađen od Č.1230. Set matrica za istiskivanje omogućuje dobijanje potrebnih unutrašnjih prečnika. Matrice su termički obrađene na tvrdoću (42÷45) HRC, a radne površine matrica su kvaliteta N6 obrađene brušenjem.

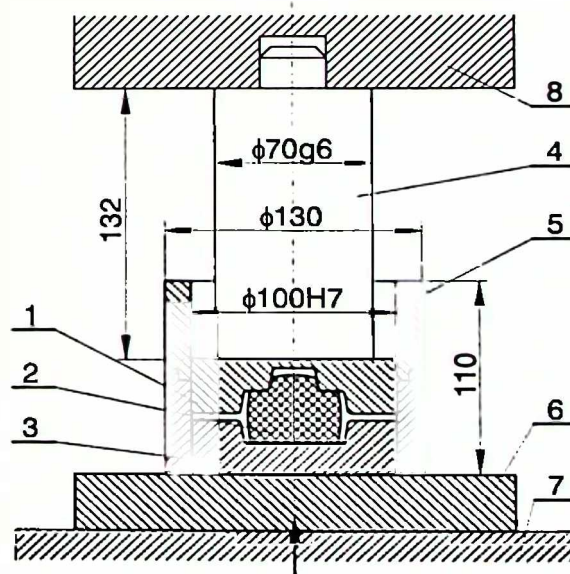
Proces istosmjernog istiskivanja se ostvaruje pomjeranjem gornjeg stola prese naviše (Slika 4.2.-a) pod dejstvom sile hidrauličnog klipa. Materijal se kreće naniže i kada šipka dostigne potrebnu dužinu proces se prekida i šipka se odsijeca na predmjeru. Istiskivanje se vrši do minimalne visine umetka približno 10 [mm].

4.5.2. Alati za deformisanje u otvorenim kalupima

Sklop alata za deformisanje u otvorenim kalupima dat je na Slici 4.6.



Slika 4.5. Sklop alata za istosmjerno istiskivanje olovnih šipki: 1 - matrica, 2 - tiskač, 3 - cjevasta vodica, 4 - materijal koji se istiskuje, 5 - držač matrice, 6 - gornji sto prese, 7 - hidraulični cilindar prese



Slika 4.6. Sklop alata za deformisanje u otvorenim kalupima: 1 - gornji kalup, 2 - donji kalup, 3 - odpresak, 4 - tiskač, 5 - cjevasta vodica, 6 - ravna ploča, 7 - donji sto prese, 8 - hidraulični cilindar

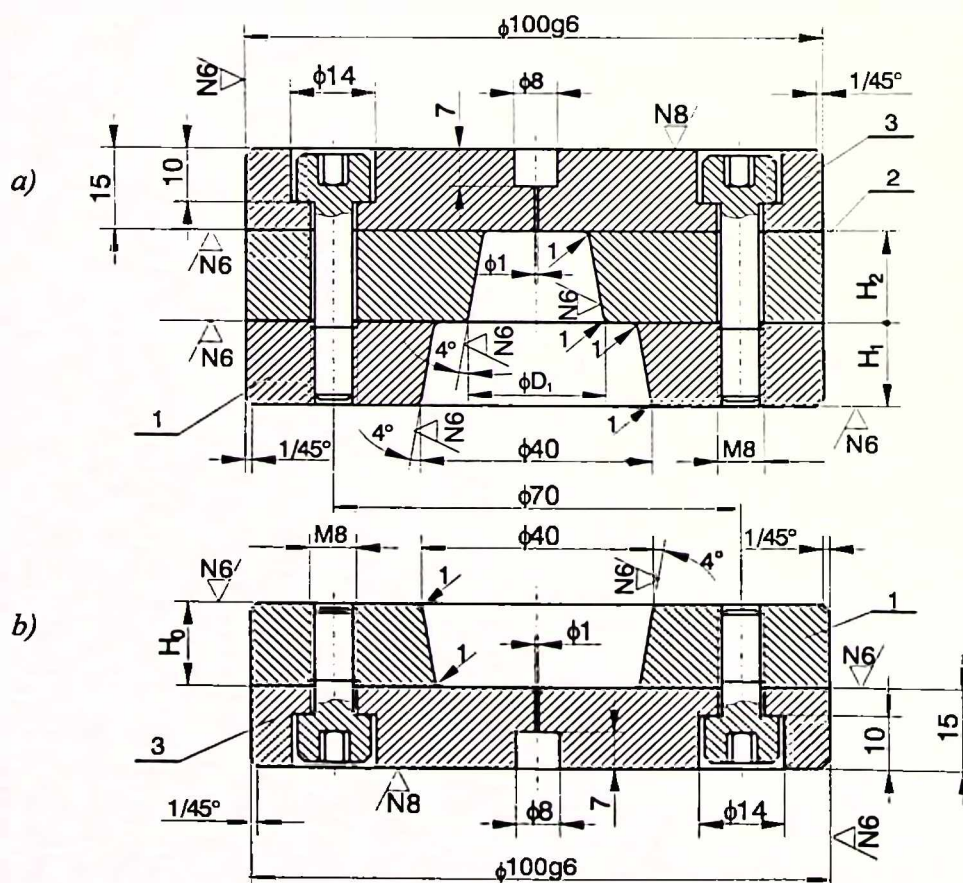
Kod alata za deformisanje u otvorenim kalupima gornji (1) i donji kalup (2) su smješteni u cjevastoj vodiči (5) koja obezbeđuje njihovu koaksijalnost tokom procesa, a kod tople obrade imaju još i ulogu kompletiranja "komore" radi održavanja konstantnosti temperature. Vodiце su izvedene iz dva dijela zbog ograničenja koje proističe iz dimenzionih karakteristika unutrašnjosti peći, kako bi mogle da se zagrijevaju zajedno sa kalupima i pripremcima.

Proces presovanja se ostvaruje dovođenjem u kretanje gornjeg stola prese (7) naviše, pod dejstvom sile hidrauličnog klipa. Pri tome se materijal obradka kreće u pravcu dejstva sile - aksijalnom i pravcu normalnom na pravac dejstva sile - radialnom pravcu.

4.5.2.1. Segmentni kalupi

Za zapreminsko deformisanje u otvorenim kalupima korišćeni su tzv. *segmentni kalupi* od alatnog čelika za rad u toplom stanju oznake Č.4751 (Utop 2) (Slika 4.7.). Ovi kalupi se sastoje od kombinovanja od segmenata - ploče koje formiraju pojedine nivoe kalupa, odnosno kompletnu unutrašnju gravuru kalupa. U skladu sa usvojenim vrijednostima u Tabeli 4.2. Ploče sa karakterističnim dimenzijama, vijcima se pričvršćuju za osnovnu ploču (3) i na taj način formiraju kruti sklop koji predstavlja kalup - gornji ili donji.

Karakteristične dimenzije pojedinih segmenata - ploče kalupa, neophodne da bi se postiglo variranje geometrijskih faktora kalupa na nivoima navedenim u Tabeli 4.2. dati su u Tabeli 4.3. Kovački nagibi su izvedeni pod uglom $\alpha=4^\circ$ u odnosu na osu, a prelazni radijusi su $r=1$ [mm] [4,82]. Ovi kalupi su termički obrađeni kaljenjem na tvrdoću 53 HRC i otpušteni na temperaturu $t=550$ [°C].



Slika 4.7. Segmentni klupi za rad u toplom stanju: a) gornji kalup i b) donji kalup

Tabela 4.3. Karakteristične dimenzije seta ploča segmentnih kalupa

Nivo	Broj komada	H ₁ [mm]	H ₂ [mm]	D ₁ [mm]
1	1	7	-	-
1	2	10	-	-
1	1	14.29	-	-
2	1	-	6	16.67
2	1	-	6	24
2	1	-	10	20
2	1	-	16.67	16.67
2	1	-	16.67	24

Segmentni kalupi imaju i prednosti i nedostatke u odnosu na kompaktne. Prednosti su:

- manji utrošak alatnog čelika za rad u toplom stanju,
- manje je vrijeme izrade,
- lakša obrada brušenjem,
- mogućnost postizanja strožijih tolerancija izrade,
- veća je masa pa je bolje održanje temperature.

Nedostaci su:

- veće gabaritne dimenzije sklopljenih kalupa pa je potrebna i veća cjevasta vođica, što uvećava masu sklopa alata za obradu deformisanjem u otvorenim kalupima, a time težu ručnu manipulaciju,
- s obzirom na veće vrijednosti odnosa prečnika i visine, strožije su tolerancije izrade cjevaste vođice, kako ne bi došlo do zaglavljivanja kalupa,
- potrebno je izvesno vrijeme sklapanja,
- moraju se koristiti vijci odgovarajućih dužina koja zavisi od zahtijevanih dimenzija unutrašnjosti kalupa.

Sagledavajući prednosti u odnosu na nedostatke, zaključuje se da su prednosti od mnogo većeg značaja, pa je iz tog razloga usvojen ovakav koncept segmentnih kalupa.

4.5.3. Alati za slobodno sabijanje

Za ostvarivanje slobodnog sabijanja izrađeni su ravni alati dimenzija $\phi d \times h = \phi 100 \times 50$ [mm] od istog materijala i istog kvaliteta obrađenih površina kao kod segmentnih kalupi. Slobodno sabijanje izvodi se na identičan način kao zapreminsko deformisanje u otvorenim kalupima (Slika 4.6.), s tom razlikom što se u cjevastu vođicu umjesto gornjeg i donjeg kalupa postavljaju ravni alati.

4.6. EKSPERIMENTALNI MATERIJAL I NJEGOVA PRIPREMA

Uzimajući u obzir definisane uslove eksperimentalnih istraživanja (Tačka 4.1.), kao eksperimentalni materijal se koristi legura aluminijuma AlMgSi0,5. Međutim, kako se u preliminarnim istraživanjima, kao i dijelu istraživanja Magistarskog rada [62] autora ove Disertacije, koristilo olovo kao modelski materijal, to se u prve dvije faze istraživanja kao eksperimentalni materijal koristi i olovo. Hemijski sastavi eksperimentalnih materijala dati su u Tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Hemijski sastav materijala korištenih u eksperimentalnim istraživanjima

Materijal	Fe%	Si%	Ti%	Cu%	Zn%	V%	Cr%	Mn%	Mg%	Ni%	Primjese
Pb	0.47	0.423	0.082	0.29	0.391	0.001	2.143	0.248	0.627	-	-
AlMgSi0,5	0.207	0.477	0.01	0.09	0.068	0.004	0.01	0.1	0.493	0.02	-

Priprema eksperimentalnih materijala zavisi od vrste materijala i faze istraživanja i izvodi se iz više operacija. Za prvu i drugu fazu istraživanja izrađuju se kompaktni pripremlci, dok su za treću fazu koja se odnosi na analizu naponsko deformacionog stanja po presjeku obradka, pored kompaktnih, razvijeni i korišćeni segmentni pripremlci od žljebastih pločica.

4.6.1. Kompaktni pripremlci

Pripremlci od olova se izrađuju tako što se najprije olovo topi i lije u trupce dimenzija $\phi d \times h = \phi 70 \times 100$ [mm]. Nakon hlađenja, od trupaca se u alatima za istosmjerno istiskivanje (Slika 4.5.), kroz odgovarajuće matrice istiskuju šipke potrebnog prečnika. Na ovaj način se postiže dobra homogenizacija livenog materijala. Šipke se sijeku nožem na predmjeru sa dodacima $\delta = (5 \div 6)$ [mm] za obradu na konačnu mjeru. Poprečnom obradom čeonih površina na strugu dobijaju se pripremlci potrebnih dimenzija.

Pripremlci od legure aluminijuma se rade od toplo istiskivanih šipki prečnika $\phi d = \phi 45$ [mm], koje se uzdužnom obradom na strugu svode na potrebne prečnike. Ovako obrađene šipke se režu nožem za odsijecanje na predmjeru, sa dodacima $\delta = (1 \div 2)$ [mm] za obradu na konačnu mjeru.

Poprečnom obradom čeonih površina na strugu dobijaju se pripremlci od legure aluminijuma potrebnih dimenzija.

Da bi se postiglo variranje faktora geometrije pripremlka X_4 na nivoima datim u Tabeli 4.2. i Tabeli 4.3. pripremlci se rade sa vrijednostima prečnika: $d_{0min} = 30.3$ [mm], $d_{0sr} = 33.4$ [mm] i $d_{0max} = 36.2$ [mm].

Visina pripremlaka se računa iz uslova konstantnosti zapremine prije početka presovanja i nakon završetka procesa presovanja:

$$V_0 = \frac{d_0^2 \pi}{4} h_0 = V_1, \quad (4.11)$$

iz čega se dobija visina pripremlka:

$$h_0 = \frac{4V_1}{d_0^2 \pi}, \quad (4.12)$$

gdje je:

V_1 - zapremina kalupa uvećana za vrijednost zapremine vijenca:

$$V_1 = V_{g1} + V_{g2} + V_d + V_v, \quad (4.13)$$

gdje su:

V_{g1} - zapremina prvog nivoa gornjeg kalupa,

V_{g2} - zapremine drugog nivoa gornjeg kalupa,

V_d - zapremine donjeg kalupa i

V_v - zapremine vijenca.

Zapremine pojedinih stepenova kalupa, zbog kovačkih nagiba (Slika 4.7.), računaju se kao zapremine zarubljenih kupa:

$$V_{g1} = \frac{\pi \cdot H_1}{3} \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 + \left(\frac{D - 2 \cdot H_1 \cdot \tan \beta}{2} \right)^2 + \frac{D(D - 2 \cdot H_1 \cdot \tan \beta)}{4} \right], \quad (4.14)$$

$$V_{g2} = \frac{\pi \cdot H_2}{3} \left[\left(\frac{D_1}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_1 - 2 \cdot H_2 \cdot \operatorname{tg} \beta}{2} \right)^2 + \frac{D_1(D_1 - 2 \cdot H_2 \cdot \operatorname{tg} \beta)}{4} \right], \quad (4.15)$$

$$V_d = \frac{\pi \cdot H_0}{3} \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 + \left(\frac{D - 2 \cdot H_0 \cdot \operatorname{tg} \beta}{2} \right)^2 + \frac{D(D - 2 \cdot H_0 \cdot \operatorname{tg} \beta)}{4} \right], \quad (4.16)$$

Zapremina vijenca je:

$$V_v = \frac{d_v^2 \cdot \pi}{4} h_v. \quad (4.17)$$

Visine priprema u zavisnosti od dimenzija kalupa i prečnika priprema i brojevi priprema u skladu sa plan matricom (Tabela 4.1.) za pojedine materijale dati su u Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Dimenzije i brojevi kompaktnih priprema

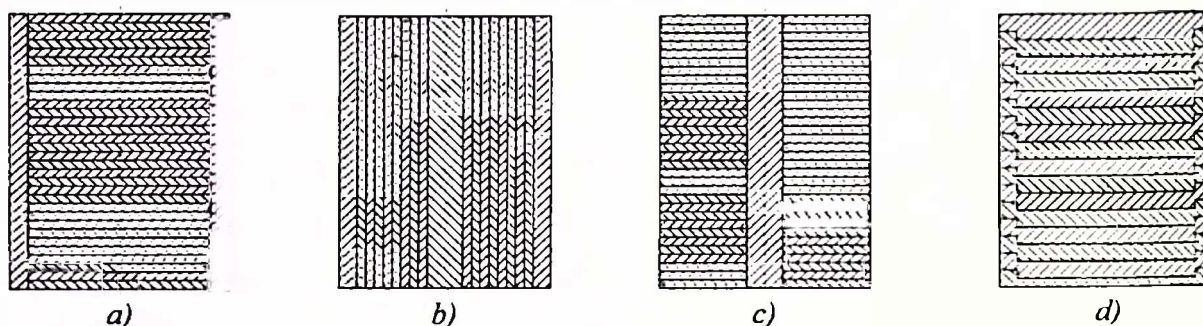
Prečnik priprema d_0 [mm]	Red. broj kalupa	Visina h_0 [mm]	Broj priprema
30.28	1	34.42	2
	2	36.33	2
	3	37.07	2
	4	42.18	2
	5	46.21	2
	6	48.12	2
	7	48.86	2
	8	53.97	2
33.56	9	33.94	4
36.30	1	23.95	2
	2	25.28	2
	3	25.80	2
	4	29.35	2
	5	32.16	2
	6	33.49	2
	7	34.00	2
	8	37.56	2

4.6.2. Segmentni pripremi

4.6.2.1. Razvoj segmentnih priprema

Radi realizacije naponsko deformacione analize obradka u meridijalnom presjeku, bilo je neophodno izraditi diskretizovane pripreme koji se sastoje od odgovarajućih segmenata. Ova ideja o fizičkoj diskretizaciji priprema predstavlja stvaranje mogućnosti da se nakon procesa deformisanja u otvorenim kalupima, pogodnom pripremom obradka, mogu izmjeriti pomjeranja karakterističnih tačaka po presjeku. Tokom pokušaja praktične realizacije ideje, pripremi su radeni na različite načine (Slika 4.8.).

Prva varijanta priprema bila je zamišljena od kružnih limenih rondela sa spoljašnjom košuljicom (a). Ovdje je moguće odrediti pomjeranja u aksijalnom pravcu, dok se u radijalnom pravcu određuju aproksimativno. Varijanta nije dala dobre rezultate zato što se usled sekundarnih normalnih napona stvaraju nabori košuljice, a postoje poteškoće oko izrade pločica.



Slika 4.8. Različiti pokušaji izvedbe segmentnih priprema

Kod druge varijante (b) koja se bazira na namotavanju trake oko jezgra, takode se stvaraju nabori kod nedovoljne debljine košuljice. Povećanjem debljine košuljice smanjuje se tačnost određivanja naponsko deformacionog stanja, a moguće je odrediti pomjeranja u radijalnom pravcu. Veoma je teška izrada ovakvih priprema.

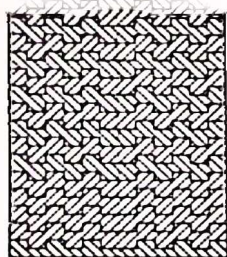
Varijanta pod (c) je naprednija od prethodne dvije usled eliminacije spoljašnje košuljice, ali postojanje "trna" za centriranje usložnjava izradu priprema. Moguće je odrediti pomjeranja u aksijalnom pravcu.

U četvrtoj varijanti sa stepenastim pločicama su eliminisani i košuljica i trn, ali je povećana složenost izrade pločica. Moguće je pratiti pomjeranja u aksijalnom pravcu i u radijalnom pravcu u predjelu promjene radijusa pločice.

Dakle, nijedna navedena varijanta nije dala dobre rezultate uglavnom iz dva zajednička razloga:

1. mogućnost određivanja pomjeranja samo u jednom pravcu i
2. mogućnost pojave klizanja među pločicama/namotajima naročito prilikom isticanja materijala u vijenac odnosno popunjavanja drugog stepena kalupa (Slika 4.1.).

Nakon analize navedenih priprema došlo se na ideju da se pripremi rade od žljebastih pločica koja predstavlja novu evolutivno kvalitativnu varijantu (Slika 4.9.).



Slika 4.9. Segmentni pripremak od žljebastih pločica

Kod ovakvih priprema žljebovi pločica u meridijalnom presjeku praktično formiraju mrežu konačnih elemenata, čiji su elementi određeni sa četiri čvora i tri linije, tako da je moguće određivanje pomjeranja čvornih tačaka i u radijalnom i u aksijalnom pravcu, a klizanje je spriječeno u oba pravca.

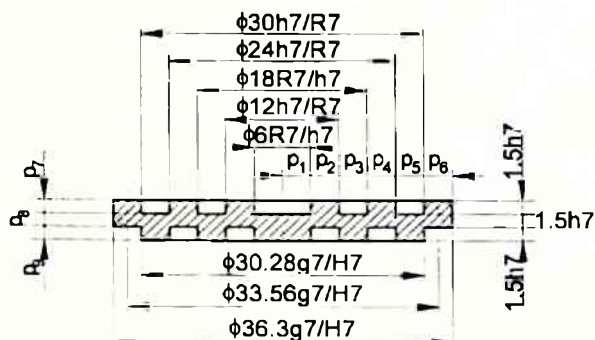
Geometrijska složenost pločica je naizgled povećana, međutim, ista se može pojednostavniti i dovesti na prihvatljivu mjeru razradom tehnologije rezanja na strugu, svođenjem na serijsku proizvodnju, pri čemu se serija odnosi na pločice istog prečnika.

4.6.2.2. Izrada segmentnih priprema od žljebastih pločica

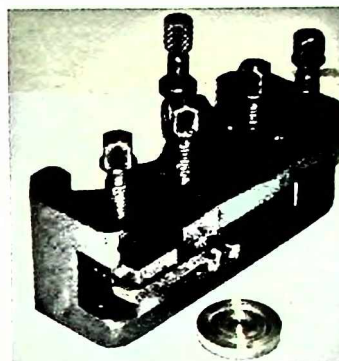
Tokom razvoja segmentnih priprema od žljebastih pločica empirijski se došlo do nominalnih vrijednosti dimenzija žljebova pločica, dok prečnici pločica odgovaraju prečnicima priprema koji moraju zadovoljiti varijaciju faktora X_4 (4.5) (Tabela 4.2.). Dimenzije žljebova pločica sa tolerancijama izrade i kvalitetom obrađene površine, date su na Slici 4.10.

Toplo istiskivane šipke od legure AlMgSi0,5 prečnika $\phi d = \phi 45$ [mm] uzdužnom obradom na strugu se svode na potrebne prečnike pločica. Ovako obrađene šipke se režu nožem za

odsijecanje na predmjeru sa dodacima $\delta=0.5$ [mm] za obradu na konačnu mjeru, tj. na visinu $h=5.5$ [mm]. Za izradu žljebova formiran je rezni alat čija je fotografija data na Slici 4.11.



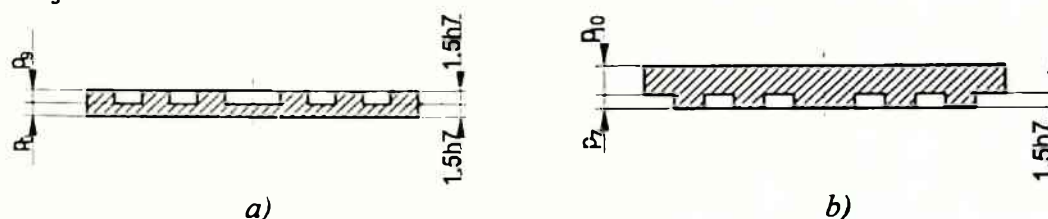
Slika 4.10. Karakteristične dimenzije pločica



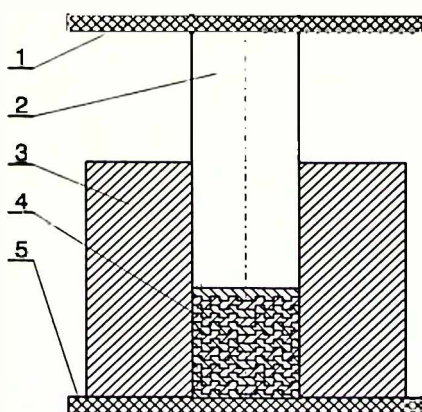
Slika 4.11. Fotografija reznog alata za izradu žljebastih pločica

Isti alat se koristi za izradu žljebova sa obadvije strane pločice, s tim što se za drugu stranu pomjera za vrijednost nominalne širine žljeba 3 [mm] u radijalnom pravcu. Radni hod alata je u aksijalnom pravcu. Napravljeni su specijalni držači pločica za odgovarajuće prečnike koji obezbeđuju maksimalnu ponovljivost operacije i izradu pločica sa propisanim tolerancijama.

Da bi se dobio segmentni pripremak od žljebastih pločica moraju postojati početna i završna pločica gledano odozdo nagore, sa jednom ravnom stranom. Ako se usvoji orijentacija žljebova kao na Slici 4.9. i Slici 4.10. onda početna i završna pločica izgledaju kao na Slici 4.12. Završna pločica se ostavlja sa dodatkom za obradu formiranog segmentnog priprema na konačnu mjeru.



Slika 4.12. Krajnje žljebaste pločice: a) početna i b) završna

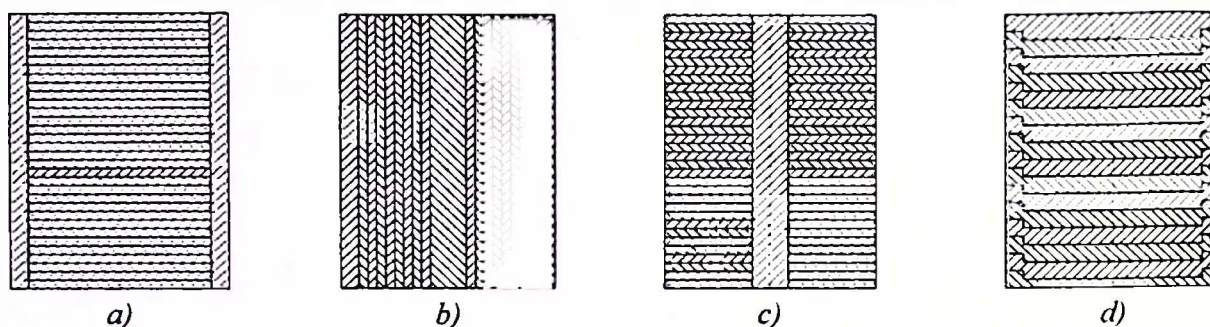


Slika 4.13. Spajanje pločica u matrici:
1 - pritiskač (hidraulički cilindar),
2 - tiskač, 3 - matrica,
4 - žljebaste pločice, 5 - osnovna ploča

Nakon izrade, potrebni broj pločica se slaže u matrice odgovarajućeg prečnika (Slika 4.13.), spajaju se i opterećuju hidrostatičkim pritiskom radi povezivanja u cjelinu. Tako dobijeni pripreмки su postojani i ponašaju se kao kompaktni u svim fazama procesa:

- manipulacije,
- zagrijavanja,
- deformisanja i
- naknadne obrade rezanjem.

Za analizu naponsko deformacionog stanja procesa zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima neophodno je uraditi po dva pripreмки u svakoj tački eksperimentalnog plana, pa je broj potrebnih žljebastih pločica popripreмку dat u Tabeli 4.6. Ukupan broj početnih, srednjih i završnih žljebastih pločica je dat u Tabeli 4.7.



Slika 4.8. Različiti pokušaji izvedbe segmentnih priprema

Kod druge varijante (b) koja se bazira na namotavanju trake oko jezgra, takode se stvaraju nabori kod nedovoljne debljine košuljice. Povećanjem debljine košuljice smanjuje se tačnost određivanja naponsko deformacionog stanja, a moguće je odrediti pomjeranja u radijalnom pravcu. Veoma je teška izrada ovakvih priprema.

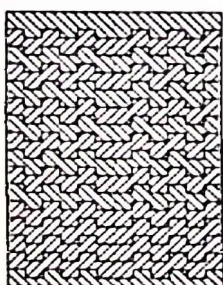
Varijanta pod (c) je naprednija od prethodne dvije usled eliminacije spoljašnje košuljice, ali postojanje "trna" za centriranje usložnjava izradu priprema. Moguće je odrediti pomjeranja u aksijalnom pravcu.

U četvrtoj varijanti sa stepenastim pločicama su eliminisani i košuljica i trn, ali je povećana složenost izrade pločica. Moguće je pratiti pomjeranja u aksijalnom pravcu i u radijalnom pravcu u predjelu promjene radijusa pločice.

Dakle, nijedna navedena varijanta nije dala dobre rezultate uglavnom iz dva zajednička razloga:

1. mogućnost određivanja pomjeranja samo u jednom pravcu i
2. mogućnost pojave klizanja među pločicama/namotajima naročito prilikom isticanja materijala u vijenac odnosno popunjavanja drugog stepena kalupa (Slika 4.1.).

Nakon analize navedenih priprema došlo se na ideju da se pripremi radi od žljebastih pločica koja predstavlja novu evolutivno kvalitativnu varijantu (Slika 4.9.).



Slika 4.9. Segmentni pripremak od žljebastih pločica

Kod ovakvih priprema žljebovi pločica u meridijalnom presjeku praktično formiraju mrežu konačnih elemenata, čiji su elementi određeni sa četiri čvora i tri linije, tako da je moguće određivanje pomjeranja čvornih tačaka i u radijalnom i u aksijalnom pravcu, a klizanje je spriječeno u oba pravca.

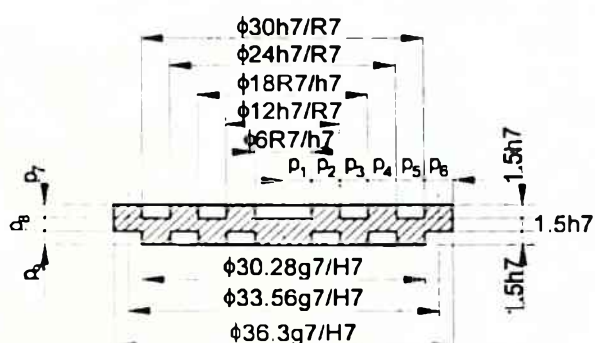
Geometrijska složenost pločica je naizgled povećana, međutim, ista se može pojednostavniti i dovesti na prihvatljivu mjeru razradom tehnologije rezanja na strugu, svođenjem na serijsku proizvodnju, pri čemu se serija odnosi na pločice istog prečnika.

4.6.2.2. Izrada segmentnih priprema od žljebastih pločica

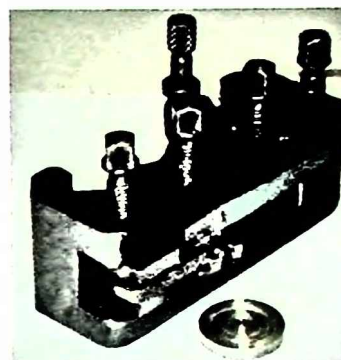
Tokom razvoja segmentnih priprema od žljebastih pločica empirijski se došlo do nominalnih vrijednosti dimenzija žljebova pločica, dok prečnici pločica odgovaraju prečnicima priprema koji moraju zadovoljiti varijaciju faktora X_4 (4.5) (Tabela 4.2.). Dimenzije žljebova pločica sa tolerancijama izrade i kvalitetom obrađene površine, date su na Slici 4.10.

Toplo istiskivane šipke od legure AlMgSi0,5 prečnika $\phi_d = \phi_{45}$ [mm] uzdužnom obradom na strugu se svode na potrebne prečnike pločica. Ovako obrađene šipke se režu nožem za

odsijecanje na predmjeru sa dodacima $\delta=0.5$ [mm] za obradu na konačnu mjeru, tj. na visinu $h=5.5$ [mm]. Za izradu žljebova formiran je rezni alat čija je fotografija data na Slici 4.11.



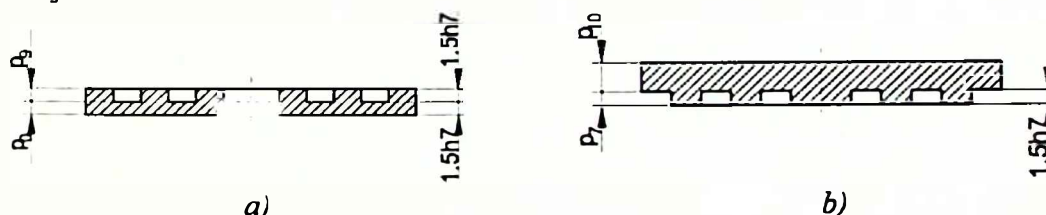
Slika 4.10. Karakteristične dimenzije pločica



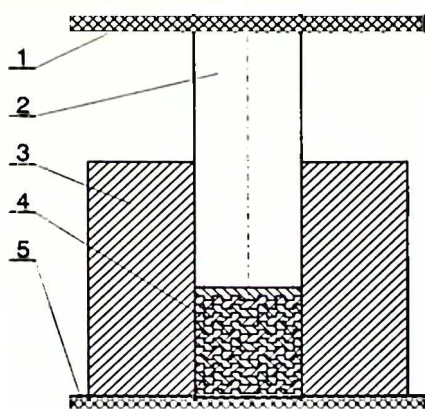
Slika 4.11. Fotografija reznog alata za izradu žljebastih pločica

Isti alat se koristi za izradu žljebova sa obadvije strane pločice, s tim što se za drugu stranu pomjera za vrijednost nominalne širine žljeba 3 [mm] u radijalnom pravcu. Radni hod alata je u aksijalnom pravcu. Napravljeni su specijalni držači pločica za odgovarajuće prečnike koji obezbeđuju maksimalnu ponovljivost operacije i izradu pločica sa propisanim tolerancijama.

Da bi se dobio segmentni pripremak od žljebastih pločica moraju postojati početna i završna pločica gledano odozdo nagore, sa jednom ravnom stranom. Ako se usvoji orijentacija žljebova kao na Slici 4.9. i Slici 4.10. onda početna i završna pločica izgledaju kao na Slici 4.12. Završna pločica se ostavlja sa dodatkom za obradu formiranog segmentnog priprema na konačnu mjeru.



Slika 4.12. Krajnje žljebaste pločice: a) početna i b) završna



Slika 4.13. Spajanje pločica u matrici:
1 - pritiskač (hidraulički cilindar),
2 - tiskač, 3 - matrica,
4 - žljebaste pločice, 5 - osnovna ploča

Nakon izrade, potrebni broj pločica se slaže u matrice odgovarajućeg prečnika (Slika 4.13.), spajaju se i opterećuju hidrostatičkim pritiskom radi povezivanja u cjelinu. Tako dobijeni pripreмки su postojani i ponašaju se kao kompaktni u svim fazama procesa:




- manipulacije,
- zagrijavanja,
- deformisanja i
- naknadne obrade rezanjem.

Za analizu naponsko deformacionog stanja procesa zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima neophodno je uraditi po dva pripreмки u svakoj tački eksperimentalnog plana, pa je broj potrebnih žljebastih pločica popripreмку dat u Tabeli 4.6. Ukupan broj početnih, srednjih i završnih žljebastih pločica je dat u Tabeli 4.7.

Tabela 4.6. Dimenzije i brojevi segmentnih priprema

d_0 [mm]	Red. br. kalupa	h_0 [mm]	Broj priprema	Br. kom. žljebastih pločica po pripremu	Cijeli br. kom. žljebastih pločica po pripremu
30.28	1	34.42	2	10.96	11
	2	36.33	2	11.57	12
	3	37.07	2	11.81	12
	4	42.18	2	13.43	14
	5	46.21	2	14.72	15
	6	48.12	2	15.33	16
	7	48.86	2	15.56	16
	8	53.97	2	17.19	17
33.56	9	33.94	8	10.74	11
36.30	1	23.95	2	7.55	8
	2	25.28	2	7.97	8
	3	25.80	2	8.13	9
	4	29.35	2	9.25	10
	5	32.16	2	10.14	11
	6	33.49	2	10.56	11
	7	34.00	2	10.72	11
	8	37.56	2	11.84	12

Tabela 4.7. Potreban broj žljebastih pločica za plan eksperimenta

d_0 [mm]	Početnih 	Središnjih 	Završnih 
30.28	16	198	16
33.56	8	72	8
36.30	16	128	16

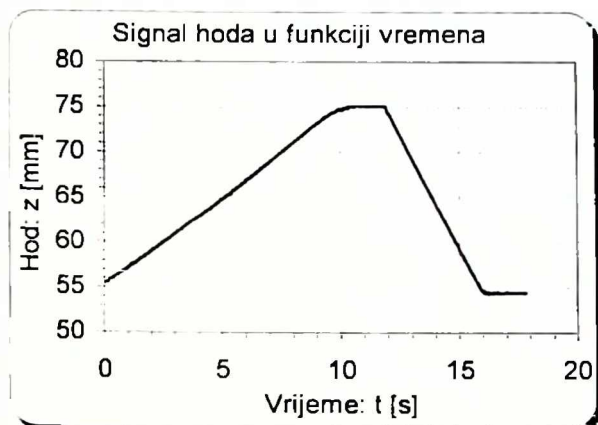
4.7. REALIZACIJA EKSPERIMENTA

4.7.1. Mjerenje deformacione sile tokom procesa deformisanja

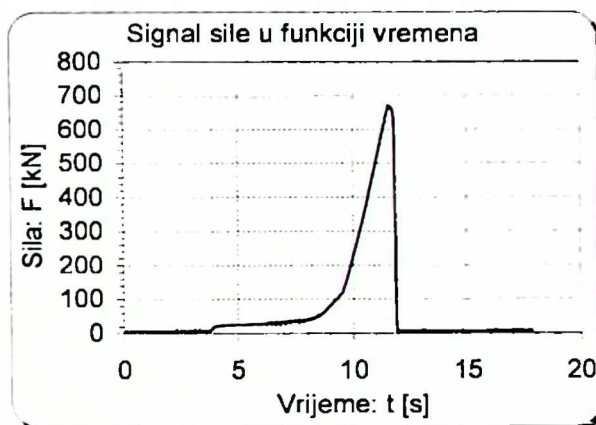
U okviru svih faza realizacije eksperimentalnih istraživanja izvršena su mjerenja deformacione sile zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima i slobodnog sabijanja. Istraživanja su izvedena saglasno planu u pojedinim fazama sa olovom u hladnom stanju i legurom aluminijuma AlMgSi0,5 u hladnom i toplom stanju. Redosled izvođenja eksperimentalnih tačaka iz plan matrice uziman je slučajno. Podmazivanje je vršeno ručnim nanošenjem sloja grafitne masti na radne površine alata. Radi postizanja izotermnog deformisanja, zajedno sa pripremcima zagrijavani su alati i cjevasta vodica.

Nakon zagrijavanja u peći, sklop alata za deformisanje, zajedno sa pripremkom (Slika 4.6) je postavljan na presu i poslije startovanja informacionog mjernog sistema za mjerenje sile u funkciji hoda, presa je puštana u rad. Deformisanje priprema je vršeno u jednom hodu, a proces se zaustavlja po dostizanju konačnih dimenzija. Kod zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima konačne dimenzije obezbeđuje čelični prsten čija je debljina jednaka zahtijevanoj visini vijenca.

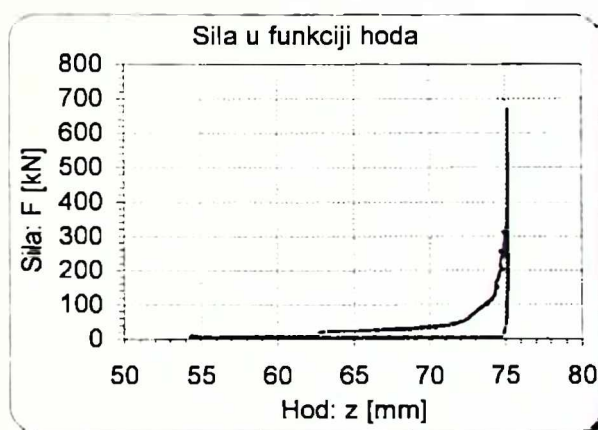
Po zaustavljanju hoda prese zaustavljan je i proces mjerenja sa informacionim mjernim sistemom, a signali sila otporničkih davača sa oba noseća stuba gornjeg stola prese i induktivnog davača hoda (Slika 4.2.) se memorišu na hard disku računara. Na Slici 4.14. i Slici 4.15. su dati navedeni signali u funkciji vremena u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 18. Upareni dijagram sile u funkciji hoda alata dat je na Slici 4.16.



Slika 4.14. Signal hoda u funkciji vremena sa induktivnog davača u centralnoj tački plana broj 18



Slika 4.15. Signal sile u funkciji vremena sa jednosg otporničkog davača u centralnoj tački plana broj 18



Slika 4.16. Sila u funkciji hoda prese u centralnoj tački plana broj 18

4.7.2. Priprema obradaka za određivanje naponsko deformisanog stanja

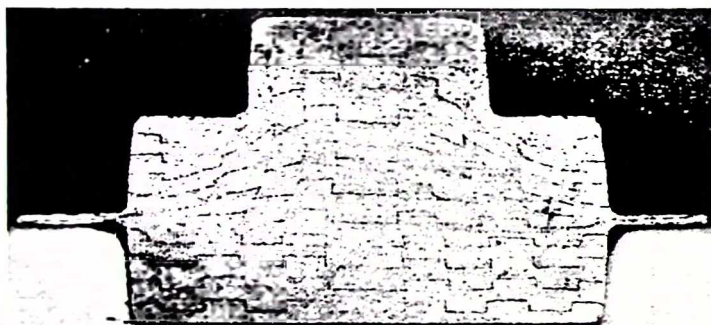
Ova faza eksperimenta, koja se odnosi na naponsko deformacionu analizu odkovka, realizovana je sa segmentnim pripremcima od žljebastih ploča (Slika 4.9.). Preliminarnim istraživanjem je utvrđeno da promjena temperature u rasponu: $t=(420\div 460)$ [°C], ne utiče na deformaciono stanje, pa deformisanje priprema u toplom stanju je vršeno na temperaturi $t=440$ [°C] sa podmazivanjem grafitnom mašću. Kako prihvaćeni metod za analizu naponsko deformacionog stanja nestacionarnog procesa deformisanja, kakav je zapreminsko deformisanje u otvorenim kalupima, metod visioplastičnosti zahtijeva određivanje kinematskog stanja koje podrazumijeva mjerenje pomjeranja karakterističnih tačaka u dva bliska trenutka, to su

deformisana dva priprema do visina vijenca: $h_{va}=3$ [mm] i konačne $h_{vb}=h_v=1$ [mm]. Do ovih vrijednosti se došlo empirijskim putem i na osnovu sličnih istraživanja u literaturi, a obezbeđenje konačnih dimenzija vršeno je pomoću čeličnih prstenova čija je debljina identična navedenim visinama vijenca, respektivno. Takođe je deformisan i treći kompaktni pripremak identičnih dimenzija, radi upoređenja radne sile.

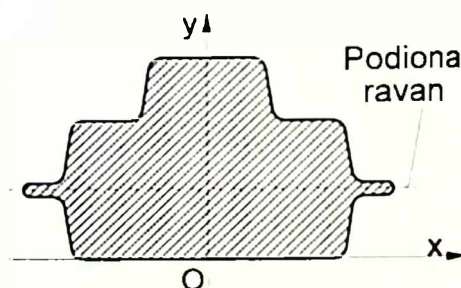
Nakon hlađenja odpresaka, obradom na glodalici skidana im je jedna polovina, do ose simetrije i ravna površina meridijalne ravni je polirana. Fino polirana površina je nagrizana 30% vodenim rastvorom NaOH u trajanju od približno 15 [min].

Nakon skidanja jedne polovine obradka do ose simetrije, odnosno, do meridijalne ravni i hemijske obrade moguće je deformisanu sliku presjeka jasno uočiti golim okom. Da bi se moglo izvršiti određivanje deformacionog stanja potrebno je odrediti numeričke vrijednosti deformisane mreže. Ovo je rađeno tako što se presjek obradka stavljao na računarski skener gdje je uz pogodno podešavanje parametara skeniranja (osvjetljenje, oština, boja) dobijena dobra digitalizovana slika presjeka u meridijalnoj ravni sa deformisanom mrežom.

Na Slici 4.17. je data digitalizovana slika presjeka obradka u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 18, datog u plan matrici (Tabela 4.1). Koordinatni sistem je usvojen tako da se ordinata poklapa sa osom obradka, a apscisa je na donjoj strani obradka (Slika 4.18.).

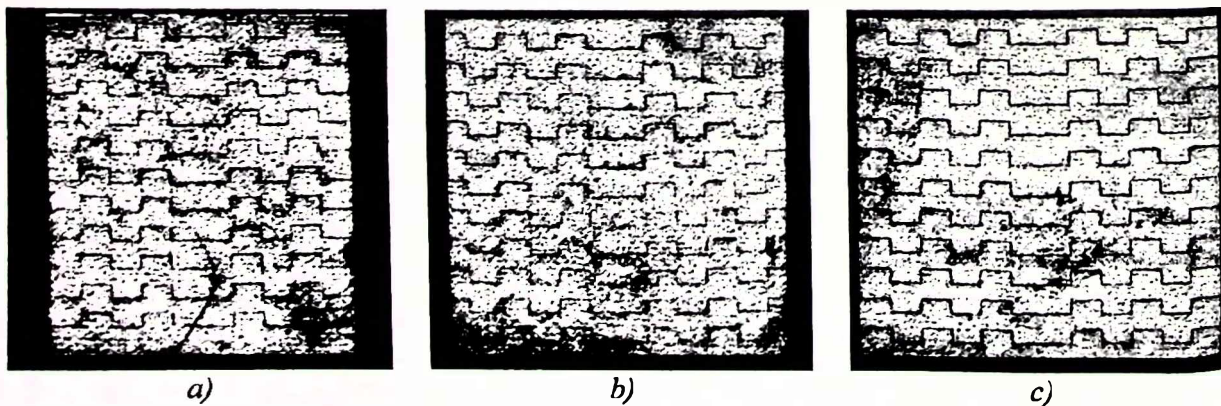


Slika 4.17. Digitalizovana slika presjeka obradka u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 18



Slika 4.18. Usvojeni koordinatni sistem

Radi određivanja tačnih vrijednosti početnih karakterističnih geometrijskih parametara žljebastih pločica u okviru gotovih segmentnih priprema, napravljeni su meridijalni presjeci i na identičan način obrađeni kao obradci nakon procesa deformisanja. Na Slici 4.19. data je njihova skenirana površina.



Slika 4.19. Digitalizovana slika presjeka priprema za prečnike:
a) $d_{0min}=30.28$ [mm], b) $d_{0sr}=33.56$ [mm], c) $d_{0max}=36.3$ [mm]

Postavlja se pitanje, da li je potrebno vršiti dimenzionu korekciju usled temperaturnog širenja kod tople obrade deformisanjem? Ako se analizira kvantitativni uticaj linearnih koeficijenata temperaturnog širenja za aluminijum na temperaturama tople obrade, koji iznose [62]:

$$|\alpha_l|_0^t = 0.1370 \cdot 10^{-3} [1/K], \text{ za } t=400 [^{\circ}\text{C}] \text{ i} \quad (4.18)$$

$$|\alpha_l|_0^t = 0.1700 \cdot 10^{-3} [1/K], \text{ za } t=500 [^{\circ}\text{C}], \quad (4.19)$$

zaključuje se da je za usvojene dimenzije odpreska njihova promjena reda veličine $\sim 1 [\mu\text{m}]$, pa se ovaj uticaj zanemaruje.

5. ODREĐIVANJE KONTAKTNOG TRENJA

Uticaj kontaktnog trenja se izražava preko koeficijenta/faktora trenja, koji je određen metodom sabijanja prstena sa odnosom geometrijskih parametara: $D_0:d_0:h_0=6:3:2$ (Slika 3.4.). U cilju dobijanja što tačnijih podataka koji direktno utiču na tačnost rezultata naponsko deformacione analize, koeficijent/faktor trenja je određen na osnovu kalibracionih krivih po raznim autorima (Slika 3.5. do Slike 3.9.). Nakon obrade podataka i analize dobijenih rezultata, su procijenjeni najtačniji rezultati i kao takavi su primijenjivani u proračunima.

5.1. SABIJANJE PRSTENA ("RING TEST")

Za naponsko deformacionu analizu na osnovu definicije eksperimenta u Tački 4.1. i vrijednosti faktora na nivoima varijacije faktora datim u Tabeli 4.2. potrebno je odrediti koeficijent/faktor trenja u uslovima:

- korišćenja eksperimentalnih materijala olova i legure AlMgSi0,5,
- na temperaturama tople obrade legure AlMgSi0,5: $t_{min}=420$ [°C], $t_r=440$ [°C] i $t_{max}=460$ [°C],
- sa podmazivanjem grafitnom mašću ili bez podmazivanja.

Ostali uslovi su:

- brzina deformisanja: $v=2$ [mm/s],
- obrada je sa ravnim alatom koji ima isti kavlitet obrade radne površine kao kod kalupa - N6.
- pripreмки se izrađuju sa istim kvalitetom obrađenih površina kao za deformisanje u otvorenim kalupima - N8,

Mjerenje geometrije prstena tokom deformisanja u hladnom stanju je jednostavno jer se proces diskretizuje po fazama i nakon mjerenja nastavlja. Kod mjerenja u toplom stanju, nakon zaustavljanja procesa pripremak mora da se hladi radi mjerenja i ponovo da se zagrijava do radne temperature, što znatno uvećava trajanje ispitivanja. Iz tog razloga je napravljen odgovarajući broj pripremak koji se deformišu do određene faze.

Usvojeno je da se mjerenja vrše na kraju pet faza deformisanja za sve uslove ispitivanja, pa, uzimajući u obzir prethodno navedeno, bilo je neophodno napraviti pripremake dimenzija i količina datih u Tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Dimenzije i količina pripremake za ispitivanje koeficijenta faktora trenja

Materijal	D_0 [mm]	d_0 [mm]	h_0 [mm]	Komada
Pb	30	15	10	2
AlMgSi0,5	36	18	12	16

Nakon sabijanja u pojedinim fazama mjereni su visina i unutrašnji prečnik. Izmjerene vrijednosti date su u Tabeli 5.2. i Tabeli 5.3. na osnovu kojih su sračunate vrijednosti stepena redukcije visine ϵ_h [%] i stepena promjene unutrašnjeg prečnika ϵ_d [%] (3.62), date u Tabeli 5.4. i Tabeli 5.5.

Tabela 5.2. Izmjerene visine prstenova po fazama sabijanja

Materijal	Temperatura t [°C]	Podmazivanje	h ₀ [mm]	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	h ₃ [mm]	h ₄ [mm]	h ₅ [mm]
Pb	20	Ne	10	8	6.60	5	4.23	3.86
		Da	10	8.76	7.70	6.20	5.40	3.70
AlMgSi0,5		Ne	12	10.40	8.85	7.66	6.68	4.86
		Da	12	10.87	9.23	7.58	6.03	4.60
	420	Da	12	9.54	8.00	6.70	5.60	5
	440		12	8.10	7.80	6.70	5.80	4.54
	460		12	10.10	8	7.10	5.90	4.91

Tabela 5.3. Izmjereni unutrašnji prečnici prstenova po fazama sabijanja

Materijal	Temperatura t [°C]	Podmazivanje	d ₀ [mm]	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	d ₃ [mm]	d ₄ [mm]	d ₅ [mm]
Pb	20	Ne	15	13.96	12.15	8.52	5.51	3.27
		Da	15	15.26	15.56	16.01	16.05	15.42
AlMgSi0,5		Ne	18	17.20	16.05	14.70	13.45	8
		Da	18	18.43	19.44	20.43	20.81	20.92
	420	Da	18	19.15	19.53	19.76	19.70	19.60
	440		18	19.42	19.44	19.55	19.46	19.13
	460		18	18.75	19.25	19.15	19.10	18.85

Tabela 5.4. Stepni redukcija visina prstenova po fazama sabijanja

Materijal	Temperatura t [°C]	Podmazivanje	ϵ_{h0} [%]	ϵ_{h1} [%]	ϵ_{h2} [%]	ϵ_{h3} [%]	ϵ_{h4} [%]	ϵ_{h5} [%]
Pb	20	Ne	0	20	34	50	57.65	61.36
		Da	0	12.40	23	38	46	63
AlMgSi0,5		Ne	0	13.33	26.25	36.17	44.33	59.50
		Da	0	9.41	23.08	36.83	49.75	61.67
	420	Da	0	20.50	33.33	44.17	53.33	58.33
	440		0	32.50	35	44.17	51.67	62.17
	460		0	15.83	33.33	40.83	50.83	59.08

Tabela 5.5. Stepni promjene unutrašnjih prečnika prstenova po fazama sabijanja

Materijal	Temperatura t [°C]	Podmazivanje	ε _{d0} [%]	ε _{d1} [%]	ε _{d2} [%]	ε _{d3} [%]	ε _{d4} [%]	ε _{d5} [%]
Pb	20	Ne	0	6.93	18.98	43.18	63.26	78.23
		Da	0	-1.73	-3.73	-6.70	-7	-2.80
AlMgSi _{0,5}		Ne	0	4.44	10.83	18.33	25.28	55.56
		Da	0	-2.39	-8.00	-13.50	-15.60	-16.20
	420	Da	0	-6.40	-8.50	-9.80	-9.44	-8.89
	440		0	-7.90	-8.00	-8.60	-8.10	-6.30
	460		0	-4.17	-6.94	-6.39	-6.11	-4.72

Dobijene vrijednosti date u Tabeli 5.4. i Tabeli 5.5. se uparaju i ucrtavaju tačke kalibracione krive po raznim autorima (Tabeli 5.6 do Tabele 5.10.). Na osnovu toga vrši procjena vrijednosti koeficijenta/faktora trenja.

Tabela 5.6. Male-Cockrofti kalibracioni dijagrami za koeficijent trenja μ

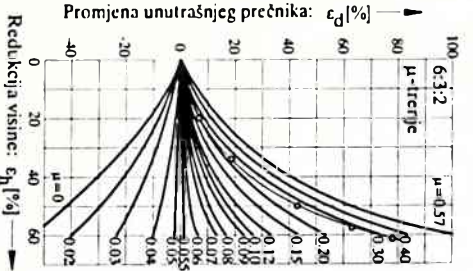
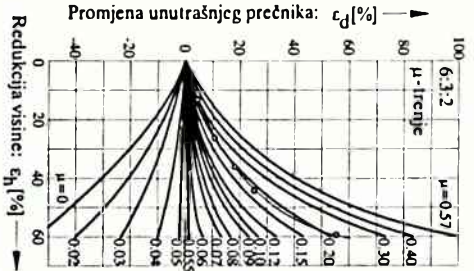
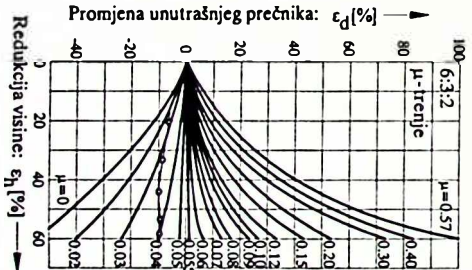
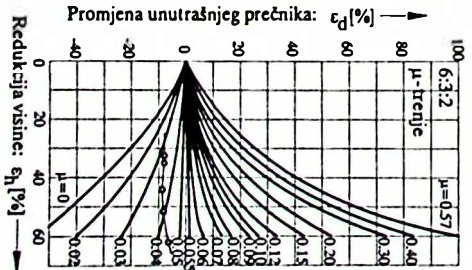
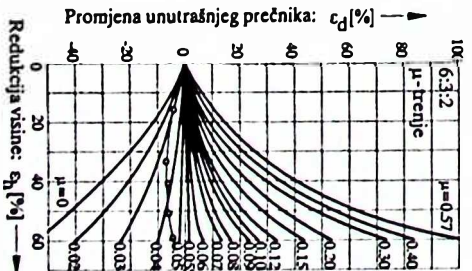
Bez podmazivanja		Sa podmazivanjem	
Pb - 20 [°C]			
			
AlMgSi0,5 - 20 [°C]			
			
420 [°C]		440 [°C]	
			
AlMgSi0,5 - Sa podmazivanjem		460 [°C]	
			

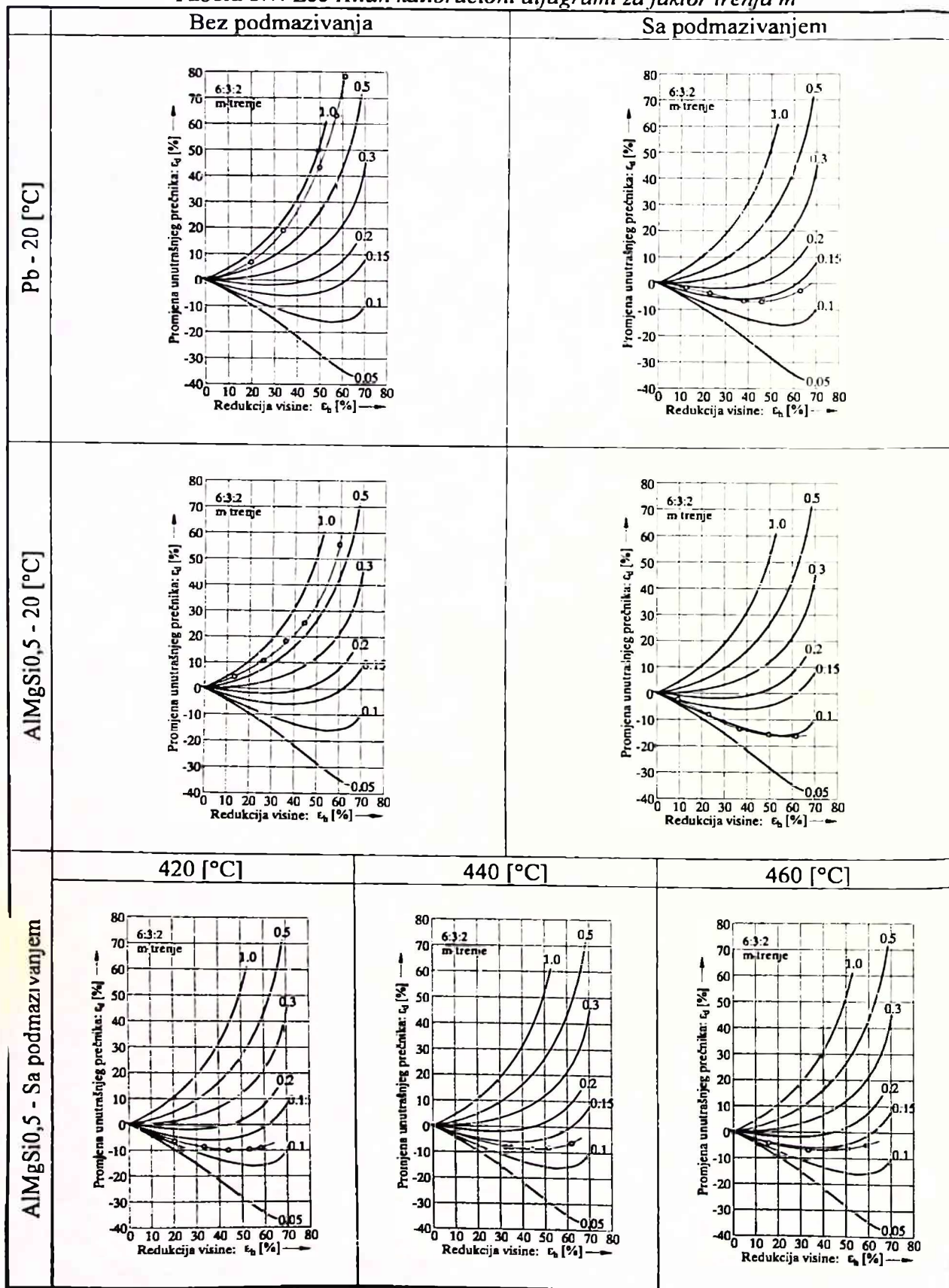
Tabela 5.7. Lee-Altan kalibracioni dijagrami za faktor trenja m 

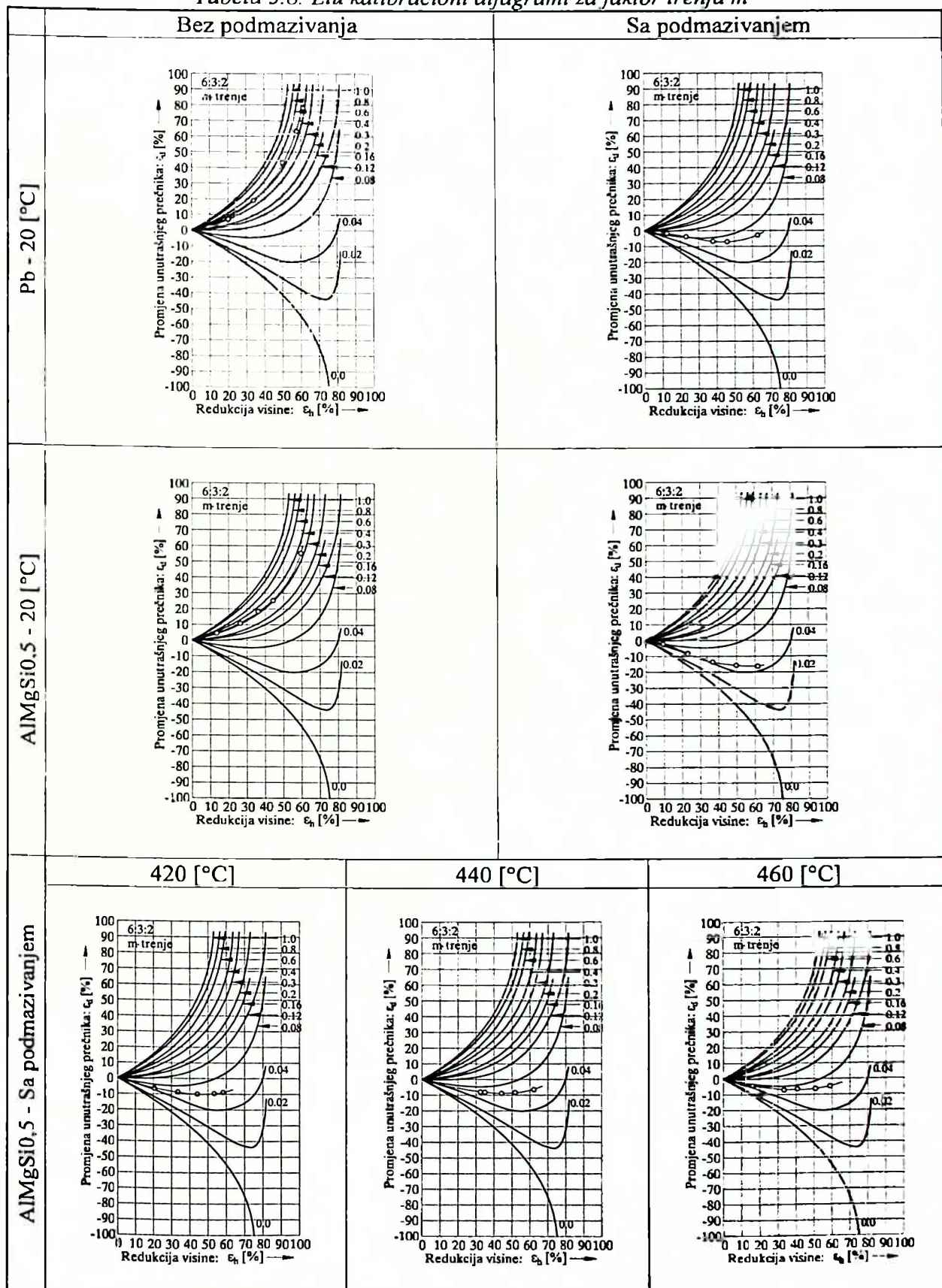
Tabela 5.8. Liu kalibracioni dijagrami za faktor trenja m 

Tabela 5.9. Wanheim-Danckert kalibracioni dijagrami za m-trenje kod idealno plastičnog materijala

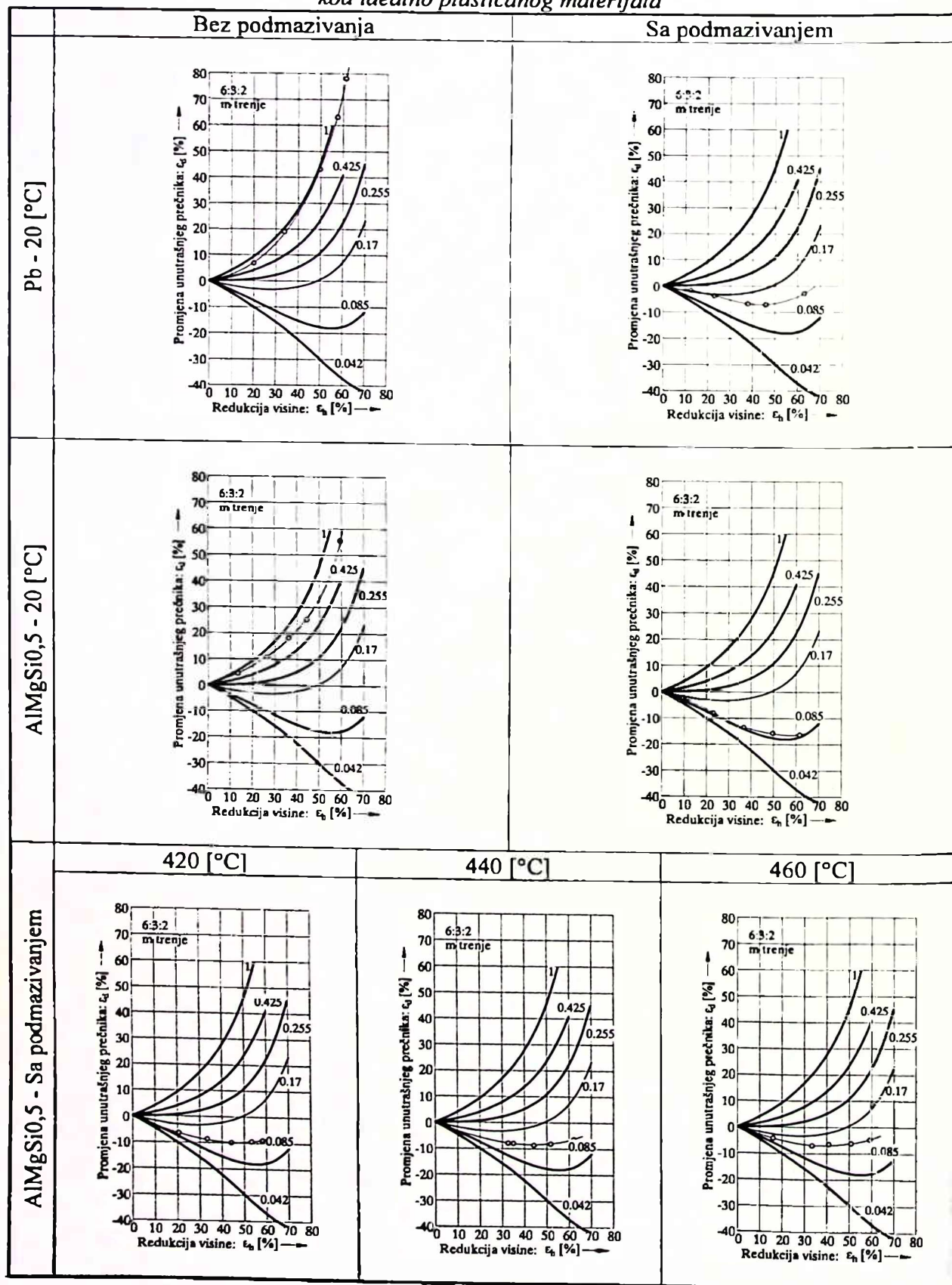
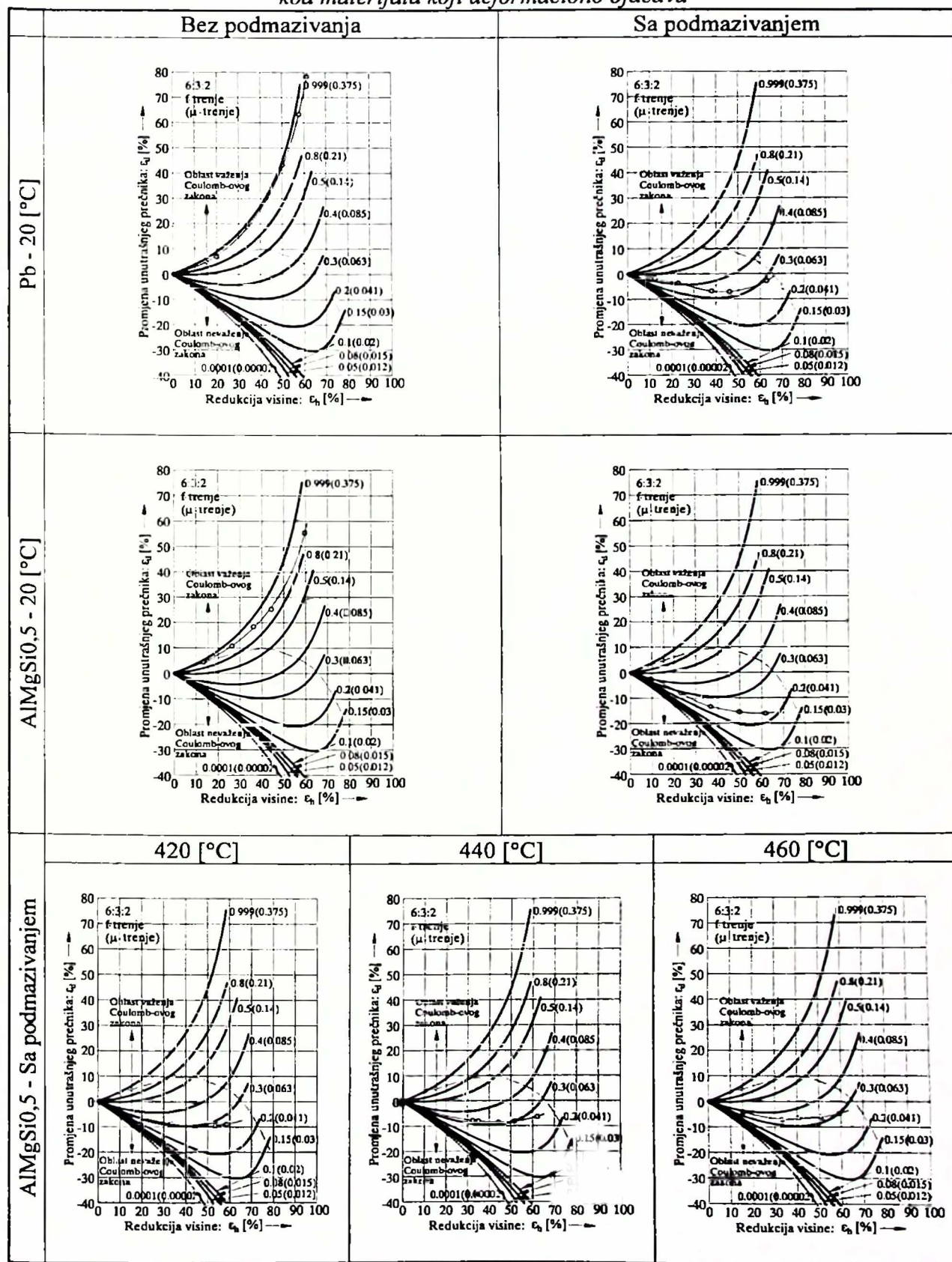


Tabela 5.10. Wanheim-Danckert kalibracioni dijagrami za $f(\mu)$ -trenje kod materijala koji deformaciono ojačava



5.2. NUMERIČKA SIMULACIJA SABIJANJA PRSTENA

Postoji veći broj radova u kojima autori određuju koeficijent/faktor trenja na osnovu mogućnosti numeričke simulacije [19,75,88]. Osnovna ideja je da se uz pomoć softverskog paketa za FEM simulaciju izvrši modeliranje promjene geometrije za date uslove deformisanja, pri variranju koeficijenta/faktora trenja.

Za određivanje koeficijenta/faktora trenja numeričkom simulacijom koristi se softverski paket DEFORM 2D (Tačka 3.9.2.). Simulira se proces sabijanja prstena za uslove date u Tački 5.9.1., s tim što se faktor trenja uzima sa sledećim vrijednostima:

$$m=0; 0.5; 0.10; 0.15; 0.20; 0.25; 0.30; 0.40; 0.50; 0.60; 0.80; 1 \quad (5.1)$$

Kao kriva ojačavanja koristi se kriva dobijena uprošćenim metodom (UM).

Za navedene vrijednosti faktora trenja m (5.1), numeričkom simulacijom je dobijena promjena geometrije tokom procesa sabijanja prstenova od olova, za određene vrijednosti hoda alata, data slikama u Tabeli 5.12. do Tabele 5.17. Direktnim određivanjem visine i unutrašnjeg prečnika sračunate su njihove deformacije u procentima i dobijene krive kalibracionih dijagrama m -trenja za olovo i leguru AlMgSi0,5 na sobnoj temperaturi i za leguru AlMgSi0,5 na temperaturama: $t_{\min}=420$ [°C], $t_{sr}=440$ [°C], $t_{\max}=460$ [°C]. Dobijeni DEFORM kalibracioni dijagrami sa unesenim vrijednostima stepena promjene unutrašnjeg prečnika u funkciji stepena redukcije visine, dobijeni eksperimentalno (Tabela 5.4. i Tabela 5.5.) dati su u Tabeli 5.18., a primjer ulaznih podataka za DEFORM simulaciju dati su u Tabeli 5.11.

Tabela 5.11. Primjer ulaznih podataka za DEFORM simulaciju sabijanja prstena od olova na $t=20$ [°C] i faktor trenja $m=0.50$

Simulation Controls	Simulation Parameters	Units UNIT				<input checked="" type="checkbox"/> SI							
	Step Controls	Geometry GEOTYP				<input checked="" type="checkbox"/> Axisymmetric							
		Number of simulation steps				NSTEP=1000							
		Step increment to save				STPINC=10							
		Primary die				PDIE(1)=1							
		Steps by				<input checked="" type="checkbox"/> Stroke							
	Stroke per step				DSMAX=0.1 [mm]								
Stopping Controls	Primary die displacement				SMAX=0, 6.00 [mm]								
Material Properties	Flow Stress data	Strain	0.00 0.05 0.11 0.17 0.24 0.31 0.38 0.46 0.55 0.65 0.76 0.88 1.01 1.17 1.36 1.59										
		Flow stress	0.00 13.43 17.84 21.06 22.75 22.95 22.30 21.69 21.25 21.32 21.90 22.48 23.48 25.34 28.24 33.23										
Objects	Name: Gornji alat <input checked="" type="checkbox"/> Rigid	Geometry		X [mm]		Y [mm]		R [mm]					
			1	0		10.00		0					
			2	45.00		10.00		0					
		Movement controls					Speed: 2 [mm/s] Angle: -90°						
	Name: Donji alat <input checked="" type="checkbox"/> Rigid	Geometry		X [mm]		Y [mm]		R [mm]					
			1	45.00		0		0					
			2	0		0		0					
	Name: Pripremak <input checked="" type="checkbox"/> Plastic	Geometry		X [mm]		Y [mm]		R [mm]					
			1	7.50		0		0					
			2	15.00		0		0					
			3	15.00		10.00		0					
4			7.50		10.00		0						
	Mesh	Number of mesh elements				MGNELM=1000							
Inter Object Interface	Gornji kalup - - Pripremak	Contact relation CNTACT				<input checked="" type="checkbox"/> Master-Slave							
		Friction model FRCFAC				Shear							
		Friction				FRCFAC=0.5							
	Donji kalup - - Pripremak	Contact relation CNTACT				<input checked="" type="checkbox"/> Master-Slave							
		Friction model FRCFAC				Shear							
		Friction				FRCFAC=0.5							

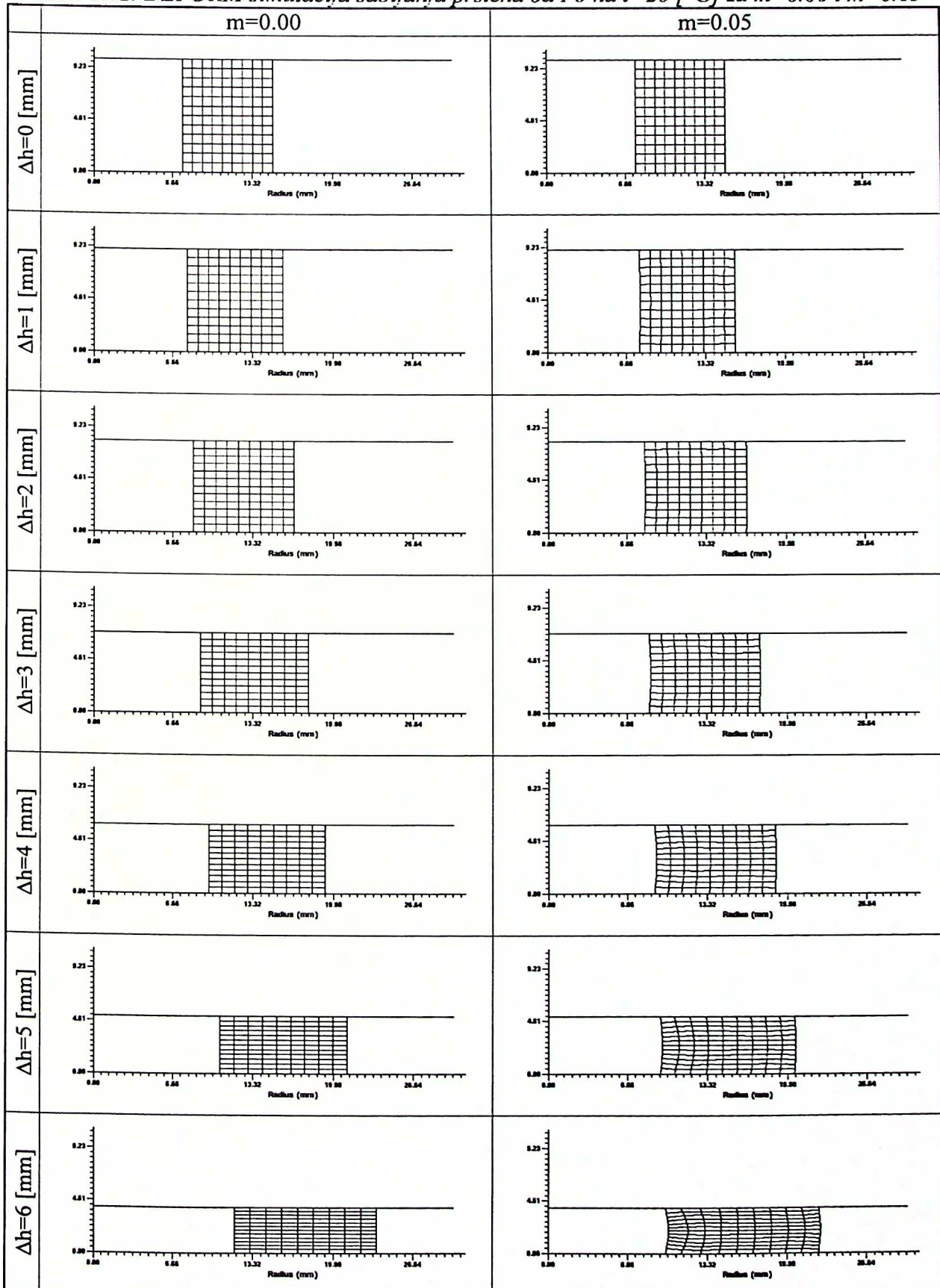
Tabela 5.12. DEFORM simulacija sabijanja prstena od Pb na $t=20$ [°C] za $m=0.00$ i $m=0.05$ 

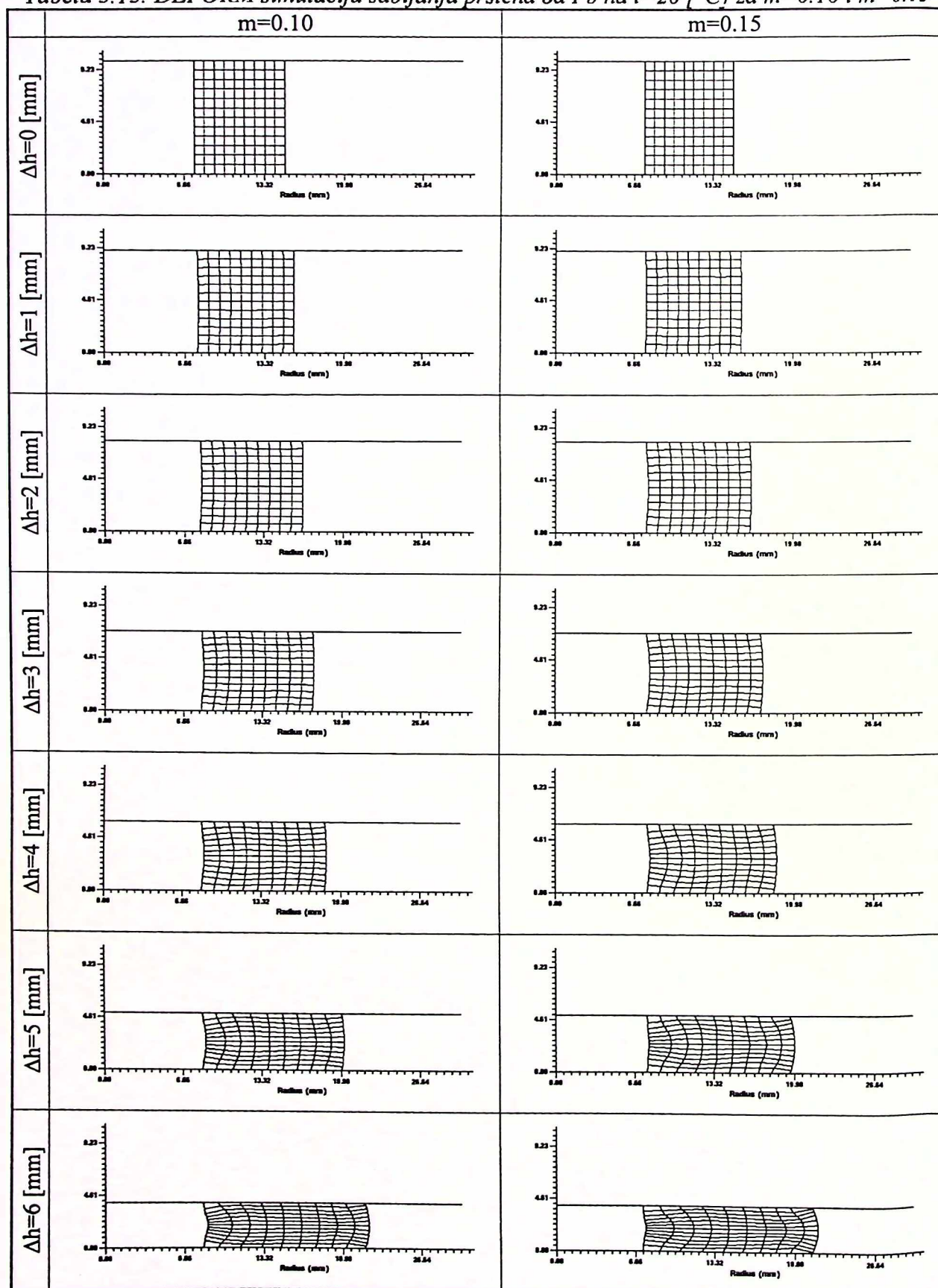
Tabela 5.13. DEFORM simulacija sabijanja prstena od Pb na $t=20$ [°C] za $m=0.10$ i $m=0.15$ 

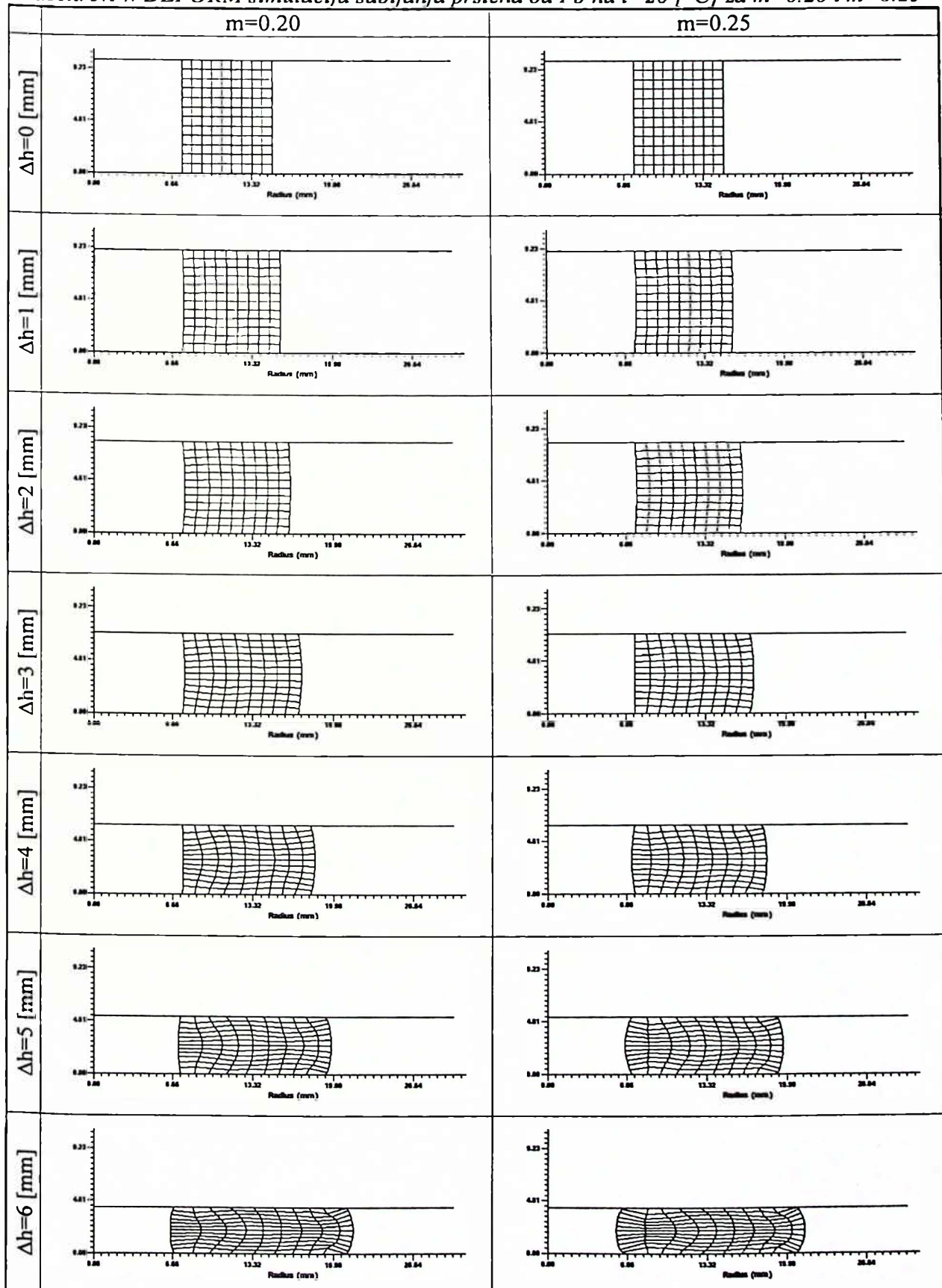
Tabela 5.14. DEFORM simulacija sabijanja prstena od Pb na $t=20$ [°C] za $m=0.20$ i $m=0.25$ 

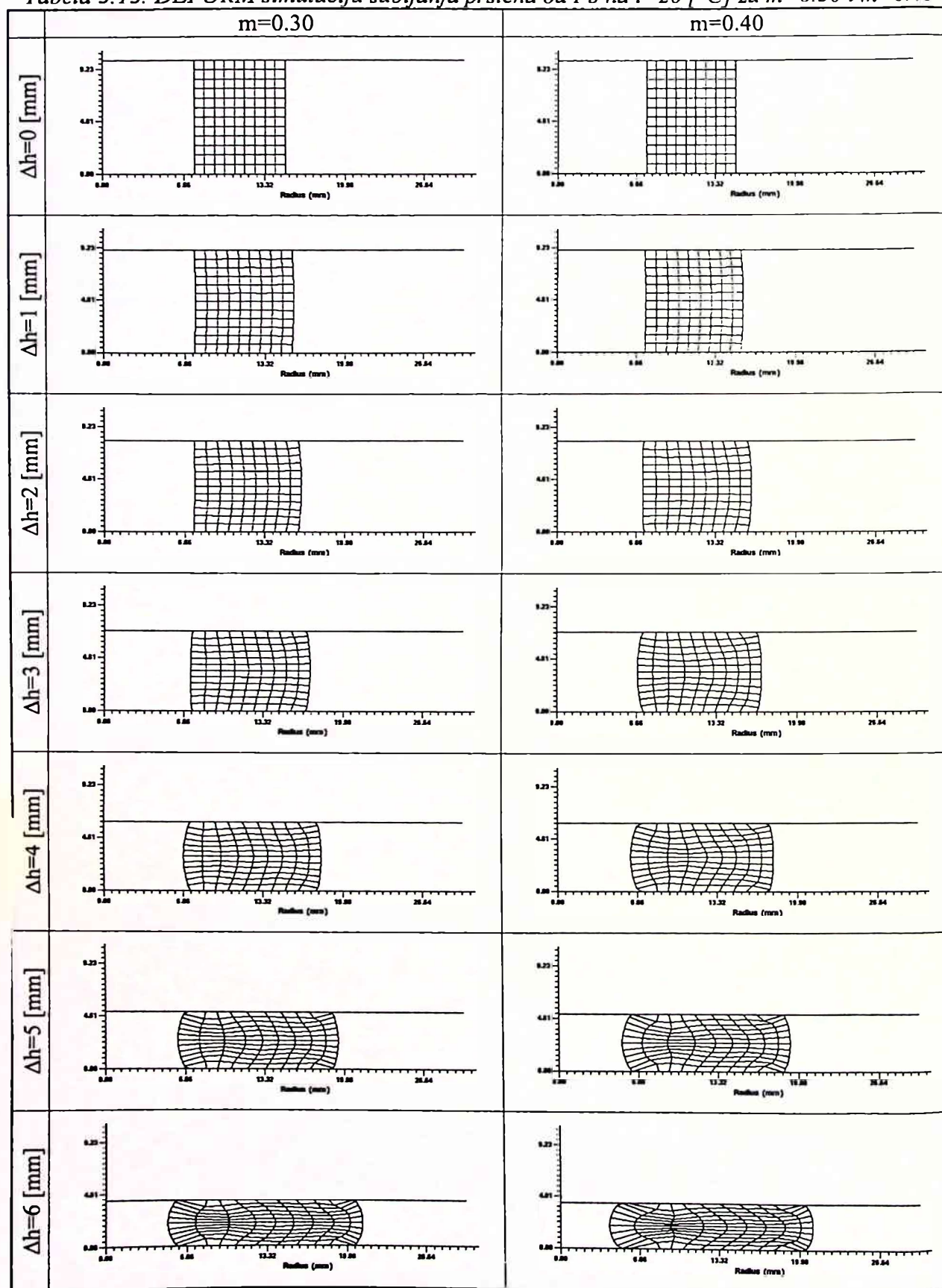
Tabela 5.15. DEFORM simulacija sabijanja prstena od Pb na $t=20$ [°C] za $m=0.30$ i $m=0.40$ 

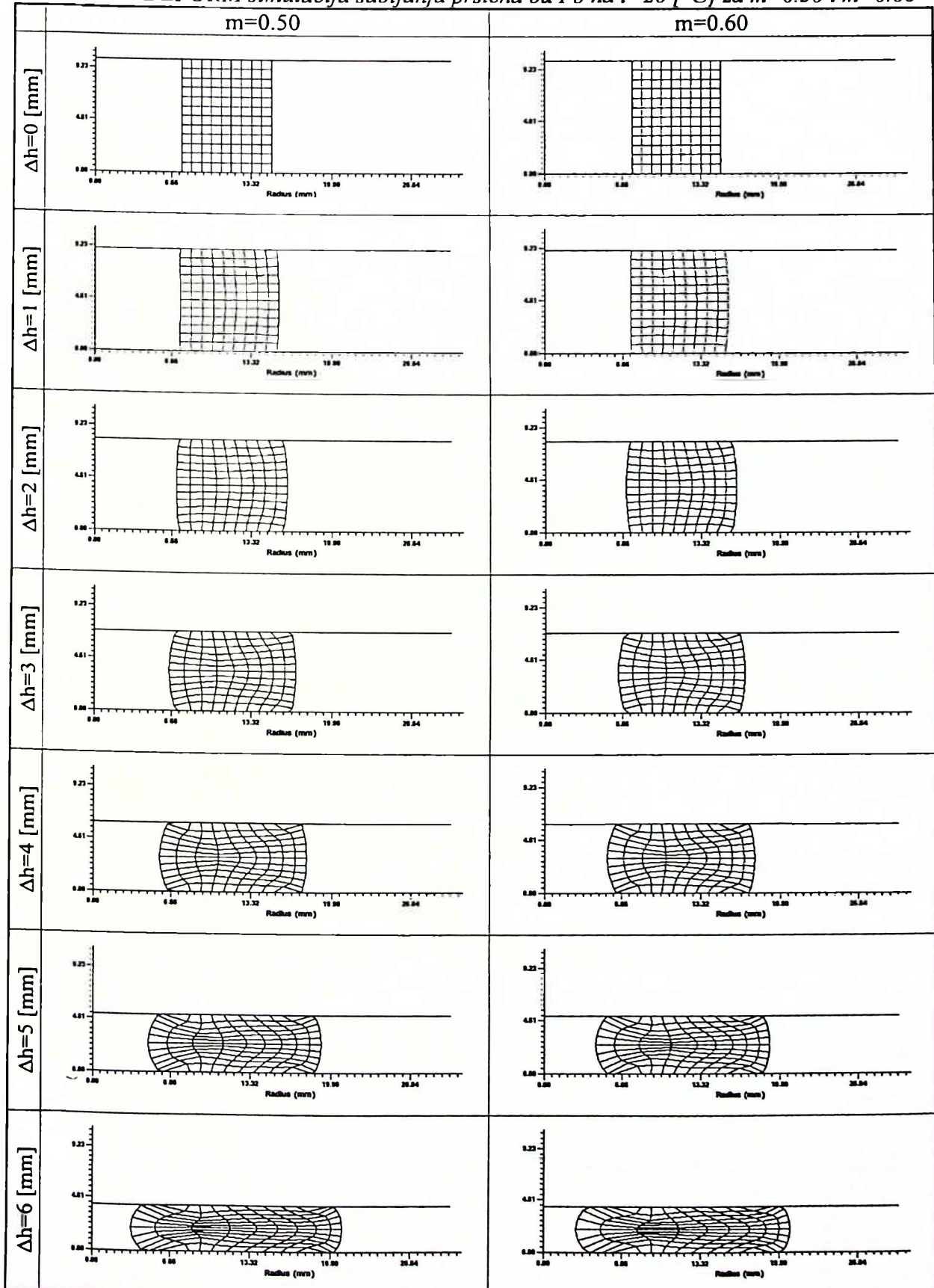
Tabela 5.16. DEFORM simulacija sabijanja prstena od Pb na $t=20$ [°C] za $m=0.50$ i $m=0.60$ 

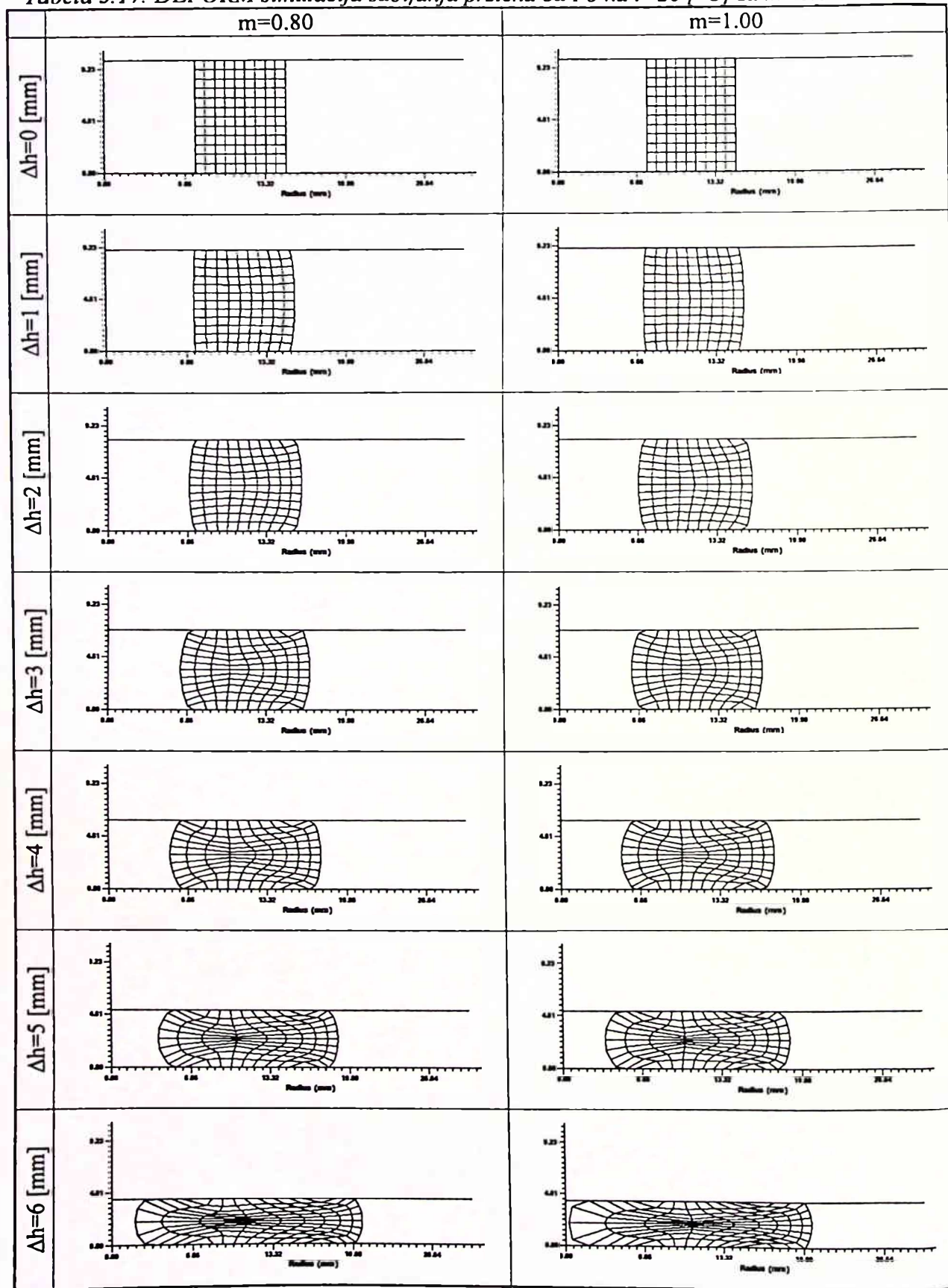
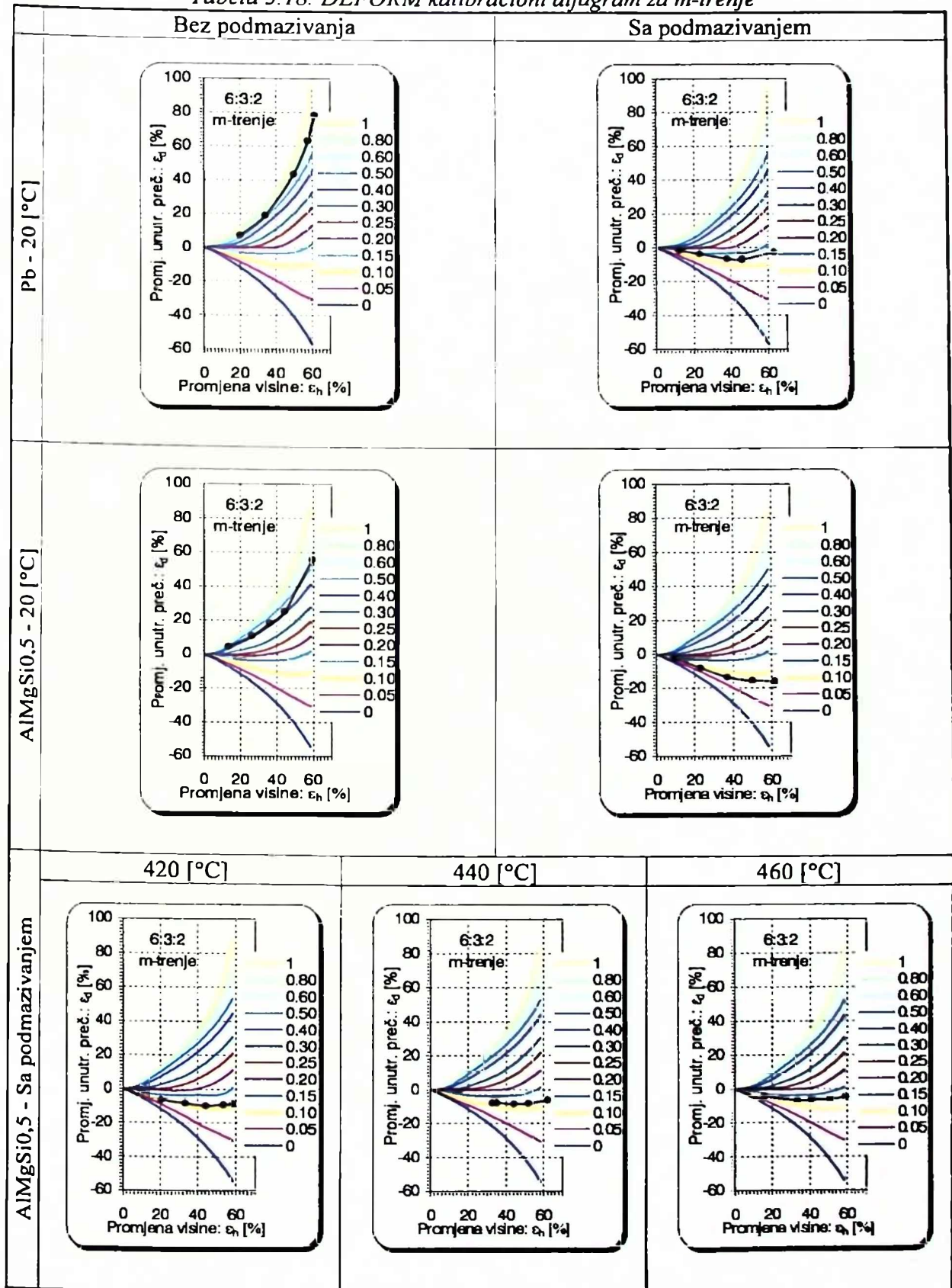
Tabela 5.17. DEFORM simulacija sabijanja prstena od Pb na $t=20$ [°C] za $m=0.80$ i $m=1.00$ 

Tabela 5.18. DEFORM kalibracioni dijagram za m-trenje



5.3. ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA/FAKTORA TRENJA

Rezultati ispitivanja trenja za različite uslove sabijanja olova i legure AlMgSi0,5 dati su kalibracionim dijagramima po raznim autorima u Tabeli 5.6. do Tabele 5.10. Sa ovih dijagrama procjenjuju se intervali vrijednosti koeficijenta/faktora trenja. U Tabeli 5.18. dati su DEFORM kalibracioni dijagrami i sa njih je moguće računarski odrediti vrijednost faktora trenja m . Ova vrijednost se dobija za vrijednost minimuma funkcije odstupanja eksperimentalno dobijenih zavisnosti stepena deformacije od DEFORM kalibracionih krivih u funkciji faktora trenja. Funkcija odstupanja stepena deformacije data je izrazom:

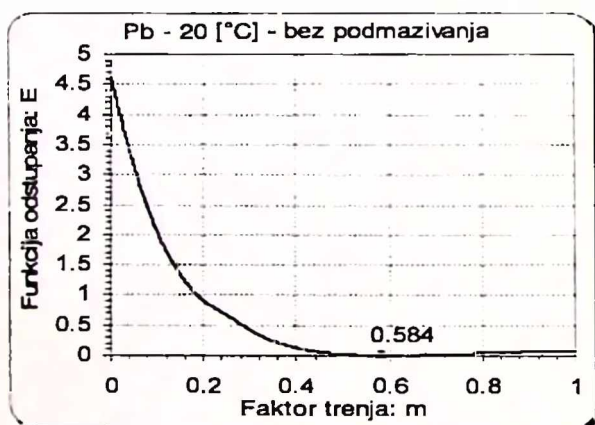
$$E(m) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\epsilon_d^{(E)}(\epsilon_h) - \epsilon_d^{(D(m))}(\epsilon_h)}{\epsilon_d^{(E)}(\epsilon_h)} \right)^2, \quad (5.2)$$

gdje su:

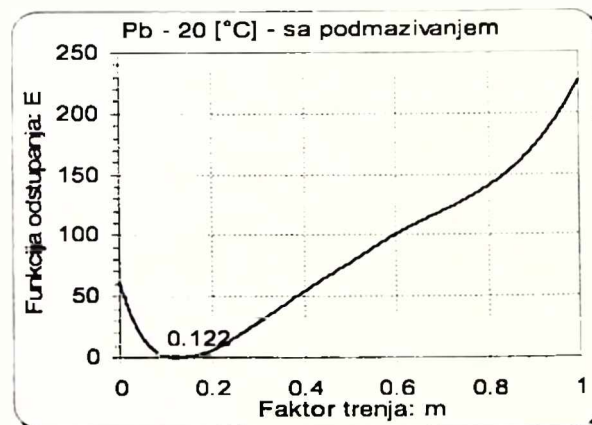
$\epsilon_d^{(E)}(\epsilon_h)$ - stepen promjene unutrašnjeg prečnika u funkciji stepena redukcije visine izmjeren eksperimentalno i

$\epsilon_d^{(D(m))}(\epsilon_h)$ - stepen promjene unutrašnjeg prečnika u funkciji stepena redukcije visine dobijen DEFORM simulacijom za različite vrijednosti faktora trenja m .

Ilustracije radi, dijagram promjene funkcije odstupanja (5.2) stepeni deformacije za olovo bez podmazivanja dat je na Slici 5.1., a sa podmazivanjem na Slici 5.2.



Slika 5.1. Funkcija odstupanja stepeni deformacije za olovo bez podmazivanja



Slika 5.2. Funkcija odstupanja stepeni deformacije za olovo sa podmazivanjem

Procijenjeni intervali vrijednosti koeficijenta/faktora trenja (Tabela 5.6. do Tabele 5.10.) i sračunati za DEFORM simulaciju dati su u Tabeli 5.19.

Tabela 5.19. Procijenjeni intervali koeficijenta/faktora trenja

Materijal	Temp. [°C]	Podm.	Nº	μ -koef. Male-C.	m-faktor Lee-Al.	m-faktor Liu	m-faktor Wanh.-D.	f-faktor Wanh.-D.	m-faktor DEFORM
Pb	20	Ne	1	0.2-0.3	0.8	0.3-0.48	0.8-0.95	0.9-0.95	0.584
		Da	2	0.035-0.05	0.13-0.18	0.06-0.1	0.15-0.17	0.29-0.42	0.122
AlMgSi0,5	20	Ne	3	0.18-0.22	0.6-0.7	0.3-0.35	0.7-0.8	0.85-0.9	0.429
		Da	4	0.025-0.035	0.09-0.11	0.04-0.05	0.085-0.1	0.24-0.4	0.086
	420	Da	5	0.025-0.04	0.12-0.13	0.05	0.14	0.27-0.31	0.111
	440	Da	6	0.03-0.045	0.13	0.06	0.15	0.28-0.32	0.114
	460	Da	7	0.03-0.048	0.14	0.07	0.16	0.3-0.35	0.122

Na osnovu procijenjenih intervala vrijednosti koeficijenta/faktora trenja uzimaju se srednje vrijednost kao njihovi ekvivalenti i ove vrijednosti date su u Tabeli 5.20. Takođe su date sračunate vrijednosti za m-faktor na osnovu Male-Cockcroft vrijednosti koeficijenta trenja μ i veza (3.58) i koeficijenta trenja μ na osnovu Wanheim-Danckert faktora trenja f i veza (3.60) i (3.61).

Tabela 5.20. Koeficijenti/faktori trenja

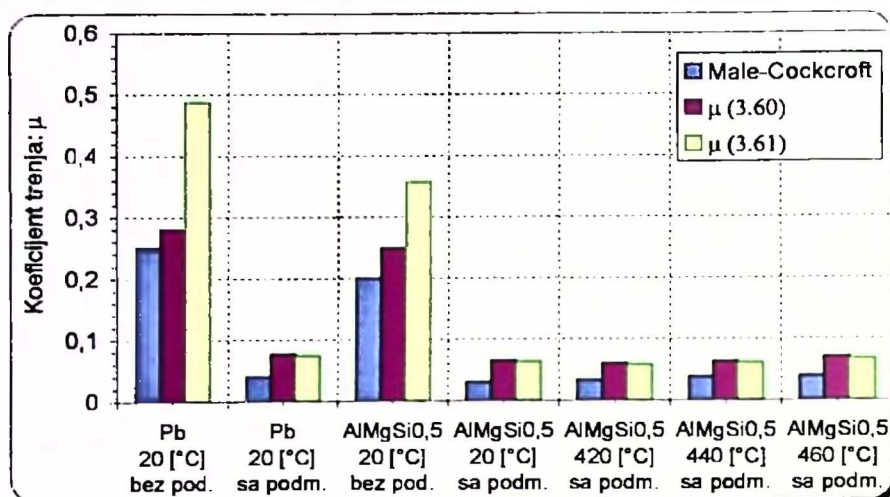
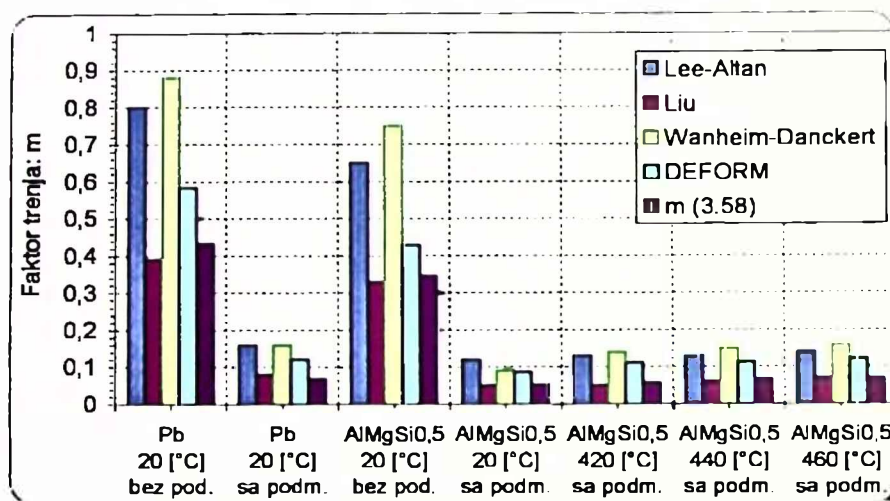
N ^o	μ -koef. <i>Male-C.</i>	m-faktor <i>Lee-Al.</i>	m-faktor <i>Liu</i>	m-faktor <i>Wanh.-D.</i>	f-faktor <i>Wanh.-D.</i>	m-faktor <i>DEFORM</i>	m-faktor (3.58)	μ -koef. (3.60)	μ -koef. (3.61)
1	0.25	0.80	0.39	0.88	0.93	0.584	0.433	0.281	0.487
2	0.04	0.16	0.08	0.16	0.36	0.122	0.069	0.077	0.074
3	0.20	0.65	0.33	0.75	0.88	0.429	0.346	0.249	0.357
4	0.03	0.10	0.05	0.09	0.31	0.086	0.052	0.065	0.063
5	0.033	0.13	0.05	0.14	0.29	0.111	0.057	0.060	0.058
6	0.038	0.13	0.06	0.15	0.30	0.114	0.066	0.063	0.061
7	0.039	0.14	0.07	0.16	0.33	0.122	0.068	0.070	0.067

5.4. ANALIZA REZULTATA ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA/FAKTORA TRENJA

Posmatranjem kalibracionih dijagrama u Tabeli 5.6. do Tabele 5.10. uočava se da je prisutno izvjesno odstupanje oblika krive koja se dobija spajanjem ucrtanih tačaka, sa krivim na kalibracionim dijagramima, u zavisnosti od uslova ispitivanja. Poklapanje je izraženo kod svih kalibracionih dijagrama za veće vrijednosti koeficijenta/faktora trenja, dok za niže vrijednosti postoje odstupanja. Dobro je poklapanje oblika ucrtane krive sa kalibracionim krivama za niže vrijednosti koeficijenta/faktora trenja kod Lee-Altan (Tabela 5.7.), Liu (Tabela 5.8.) i Wanheim-Danckert za idealno plastične materijale (Tabela 5.9.). Kod Male-Cockcroft kalibracionih dijagrama oblik značajno odstupa (Tabela 5.6.), dok kod Wanheim-Danckert kalibracionih krivih za faktor trenja f nije veliko odstupanje (Tabela 5.10.). Posljednji kalibracioni dijagrami su značajani zbog toga što ukazuju na oblast važenja Coulomb-ovog zakona sa kojih se zaključuje da ovaj zakon važi u uslovim viših vrijednosti faktora trenja f pa praktično ima smisla određivati koeficijent trenja μ samo kod deformisanja olova i legure AlMgSi0,5 u hladnom stanju bez podmazivanja.

Kalibracioni dijagrami Lee-Altan i Wanheim-Danckert za idealno plastične materijale nijesu dovoljno precizni za određivanje većih vrijednosti faktora trenja $m=(0.5 \div 1)$.

Dobijene vrijednosti koeficijenta/faktora trenja za pojedine uslove deformisanja po raznim autorima, prikazane u Tabeli 5.20. mogu se učiniti preglednijim prikazom u obliku histograma. Koeficijenti trenja - μ prikazani histogramom dati su na Slici 5.3., a faktori trenja m su prikazani na Slici 5.4.

Slika 5.3. Koeficijenti trenja - μ za razne uslove deformisanjaSlika 5.4. Faktori trenja - m za razne uslove deformisanja

Sa navedenih histogarama se uočava nejednakost vrijednosti koeficijenta faktora trenja dobijenog na različite načine za iste uslove deformisanja. Analizom koeficijenta trenja - μ se zaključuje da su vrijednosti dobijene korišćenjem Male-Cockcroft kalibracionih dijagrama niže od vrijednosti dobijenih na osnovu jednačina (3.60) i (3.61). Ove su pak ujednačene za niže vrijednosti koeficijenta trenja - μ dok za više vrijednosti znatno odstupaju, tj. za oblast važenja Coloumb-ovog zakona. U toj oblasti dobijene su bliže vrijednosti pomoću Male-Cockcroft kalibracionih dijagrama i na osnovu jednačina (3.60), a razlika se smanjuje sa porastom koeficijenta trenja μ .

Sa histograma na Slici 5.4. se zaključuje da postoji odstupanje u vrijednostima faktora trenja m . Generalno, najviše vrijednosti se dobijaju korišćenjem Wanheim-Danckert kalibracionih dijagrama, a najniže pomoću Liu kalibracionih dijagrama. Najviše je poklapanje rezultata dobijenih sa Liu kalibracionih dijagrama i izraza (3.58). Vrijednosti dobijene po Lee-Altan-u i Wanheim-Danckert-u su bliske, naročito za niže vrijednosti faktora trenja - m . Vrijednosti dobijene DEFORM simulacijom praktično predstavljaju srednju vrijednost prethodne dvije grupe rezultata.

Ocjene iskazane prethodnom analizom mogu se sistematizovati u Tabeli 5.21.

Tabela 5.21. Ocjena koeficijenta/faktora trenja

N ^o	μ -koef. <i>Male-C.</i>	m-faktor <i>Lee-Al.</i>	m-faktor <i>Liu</i>	m-faktor <i>Wanh.-D.</i>	f-faktor <i>Wanh.-D.</i>	m-faktor <i>DEFORM</i>	m-faktor <i>(3.58)</i>	μ -koef. <i>(3.60)</i>	μ -koef. <i>(3.61)</i>
1	DP, OK	DP, VV	DP, NV	DP, EV	DP, OK	DP, OK	NV	OK	VV
2	NC, LP	DP, VV	DP, NV	DP, EV	SP	DP, OK	NV	NC	NC
3	DP, OK	DP, VV	DP, NV	DP, EV	DP, OK	DP, OK	NV	OK	VV
4	NC, LP	DP, VV	DP, NV	DP, OK	SP	DP, OK	NV	NC	NC
5	NC, LP	DP, OK	DP, NV	DP, EV	SP	DP, OK	NV	NC	NC
6	NC, LP	DP, OK	DP, NV	DP, EV	SP	DP, OK	NV	NC	NC
7	NC, LP	DP, OK	DP, NV	DP, EV	SP	DP, OK	NV	NC	NC

Oznake:

NC - Ne Važi Coulomb-ov zakon trenja

DP - Dobro Poklapanje sa kalibracionim krivim

LP - Loše Poklapanje sa kalibracionim krivim

SP - Srednje Poklapanje sa kalibracionim krivim

VV - Visoka Vrijednost

NV - Niska Vrijednost

OK - Može se primijeniti kalibracioni dijagram za date uslove

Na osnovu ocjene dobijenih vrijednosti koeficijenta/faktora trenja, može se zaključiti da u određenim uslovima najbolje rezultate daju sledeći kalibracioni dijagrami:

- Male-Cockcroft - za određivanje koeficijenta trenja - μ kod olova i legure AlMgSi0,5 u hladnom stanju bez podmazivanja,
- Lee-Altan - za određivanje faktora trenja - m legure AlMgSi0,5 u toplom stanju na temperaturama obrade: $t_{min}=420$ [°C], $t_{sr}=440$ [°C], $t_{max}=460$ [°C], sa podmazivanjem grafitnom masti,
- Wanheim-Danckert - za određivanje faktora trenja - m legure AlMgSi0,5 u hladnom stanju sa podmazivanjem,
- Wanheim-Danckert - za određivanje faktora trenja - f olova i legure AlMgSi0,5 u hladnom stanju bez podmazivanja,
- Koeficijent trenja - μ na osnovu izraza (3.60) i Wanheim-Danckert kalibracionog dijagrama za materijal koji deformaciono ojačava.

Vrijednosti faktora trenja m, obijene numeričkom DEFORM simulacijom (Tabele 5.20.) mogu biti primijenjeni u svim definisanim uslovima deformisanja (Tabeli 5.21.). U daljem radu koristitiće se upravo ove vrijednosti faktora trenja - m, i smatraće se najtačnijim ulaznim podacima za faktor trenja m kod numeričkih simulacija.

6. ODREĐIVANJE KRIVIH OJAČAVANJA (KO)

U cilju određivanja relevantnih vrijednosti napona tečenja koji će biti korišćeni u radu, u uslovima definisanim u Tački 4.1. krive ojačavanja biće određene na osnovu metoda datih u Tački 3.7.1. do Tačke 3.7.5. Nakon određivanja krivih ojačavanja biće procijenjeni dobijeni rezultati i usvojene krive ojačavanja za postavljene uslove.

6.1. ODREĐIVANJE KO METODOM IZRAŽENE ZONE DEFORMACIJE (MIZOD)

Za određivanje koeficijenta trenja metodom izražene zone deformacije za definisane uslove eksperimentalnih istraživanja, napravljeni su pripremci odgovarajućeg oblika (Slika 3.10.) i dimenzija preporučenih u Tački 3.7.1. Potrebno je izraditi po dva priprema za sve uslove deformisanja, jer se na jednom pripremu mjeri promjena geometrije koja zahtijeva diskretizaciju procesa deformisanja, a na drugom sila u funkciji hoda za čitav proces. Dimenzije i potrebni brojevi komada dati su u Tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Dimenzije i potreban broj priprema za MIZOD (Slika 3.10.)

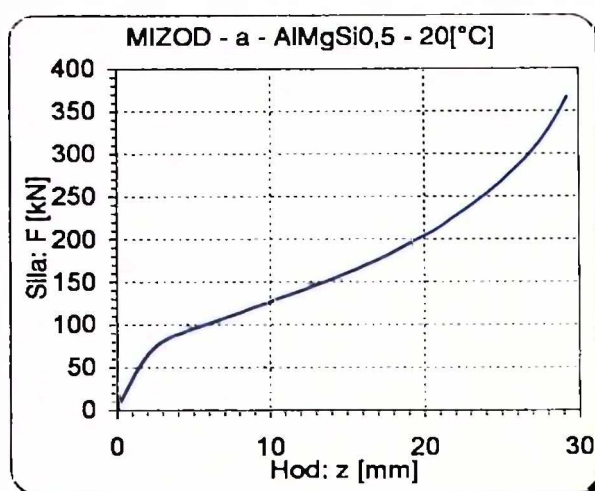
	Uzorak	D [mm]	R [mm]	a [mm]	H ₀ [mm]	d ₀ [mm]	h ₀ [mm]	Kom.
Pb	(a)	33.4	33	5	50	24	10	2
	(b)	33.4	33	5	40	24	0	2
AlMgSi _{0,5}	(a)	33.4	33	5	50	24	10	8
	(b)	33.4	33	5	40	24	0	8

Primjer određivanja krive ojačavanja po MIZOD-u biće dat za leguru AlMgSi_{0,5} na sobnoj temperaturi. Promjena bitnih geometrijskih parametara data je u Tabeli 6.2. a promjena sile u funkciji hoda na Slici 6.1.

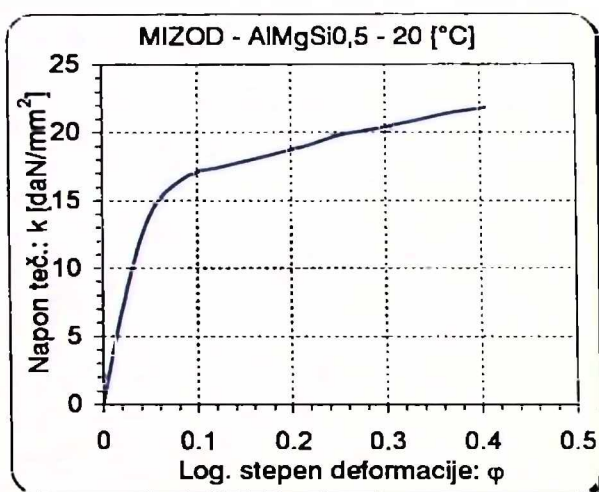
Tabela 6.2. Promjena geometrije po fazama deformisanja kod MIZOD za AlMgSi_{0,5} na $t=20$ [°C]

Faza	1	2	3	4	5	6	7	8
d _a [mm]	25.80	27.20	28.90	30.45	31.50	32.85	34.10	36
H _a [mm]	46.70	44.50	41.80	39.10	36.60	34.40	31.50	29.10
d _b [mm]	26.05	27.70	29.70	30.75	32.50	33.90	35.75	38.20
H _b [mm]	36.94	34.35	31.22	29.20	26.44	24.30	22	19.36

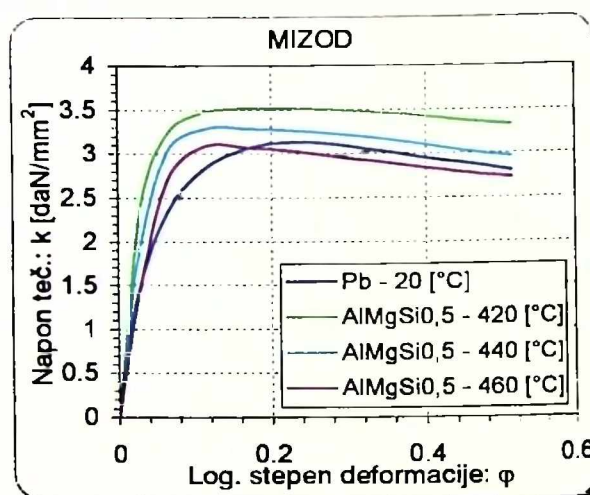
Na osnovu prethodno datog i izraza (3.63) do (3.67) dobija se kriva ojačavanja po MIZOD-u, data na Slici 6.2. Dobijene krive ojačavanja za ostale uslove deformisanja prikazane su na zajedničkom dijagramu na Slici 6.3.



Slika 6.1. Sila sabijanja priprema (a) kod MIZOD-a za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C]



Slika 6.2. Kriva ojačavanja po MIZOD-u za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C]



Slika 6.3. Krive ojačavanja po MIZOD-u za ostale uslove deformisanja

6.2. ODREĐIVANJE KO METODOM SABIJANJA HIDRODINAMIČKIM TRENJEM (MSHT)

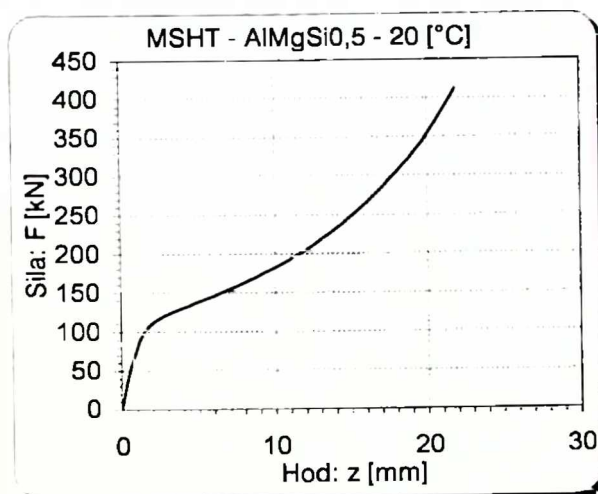
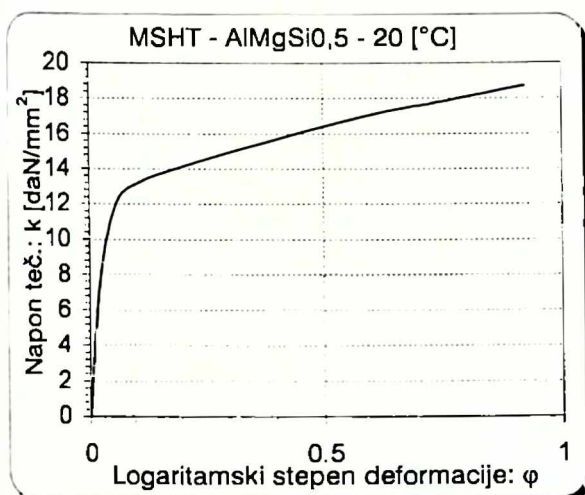
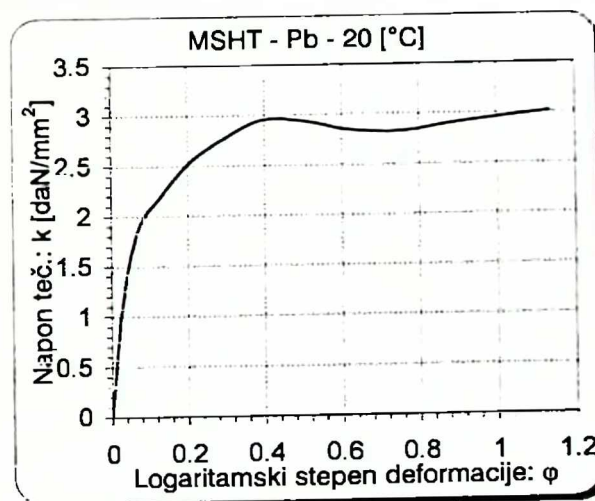
MSHT je veoma teško realizovati u uslovima tople obrade zbog postajanja čeonih udubljenja u koja se stavlja mazivo. Iz tog razloga krive ojačavanja kod olova i kod legure AlMgSi0,5 određuju se na sobnoj temperaturi.

Potrebno je napraviti po jedan pripremak jer se podrazumijeva jednoosno naponsko stanje, pa se geometrija u toku procesa određuje na osnovu promjene visine. Dimenzije usvojene u skladu sa preporukama datim u Tački 3.7.2. date su u Tabeli 6.3.

Potrebno je snimiti promjenu sile u funkciji hoda jednog priprema za određeni uslov i na osnovu poznatih izraza za stvarni napon, dobija se kriva ojačavanja. Sila u funkciji hoda kod legure AlMgSi0,5 na sobnoj temperaturi data je na Slici 6.4. a krive ojačavanja za leguru AlMgSi0,5 i olovo na Slici 6.5. i Slici 6.6.

Tabela 6.3. Karakteristične dimenzije priprema za MSHT (Slika 3.10.)

	d_0 [mm]	h_0 [mm]	u [mm]	t [mm]	Komada
Pb	33.4	35	2	0.7	1
AlMgSi0,5	33.4	35	2	0.7	1

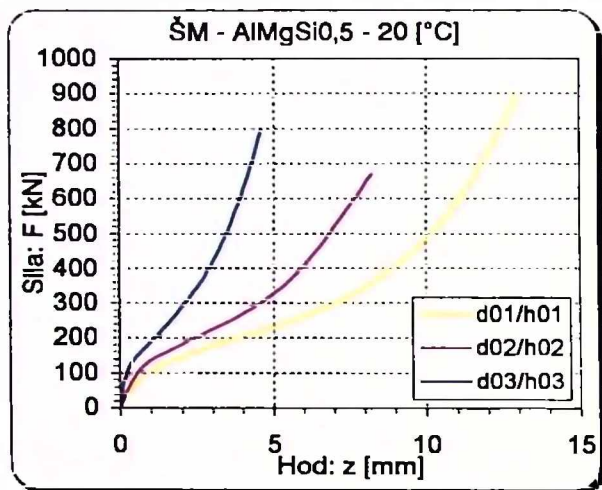
Slika 6.4. Sila sabijanja kod MSHT za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C]Slika 6.5. Kriva ojačavanja po MSHT-u za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C]Slika 6.6. Kriva ojačavanja po MSHT-u za olovo na $t=20$ [°C]

6.3. ODREĐIVANJE KO ŠOFMANOVIM METODOM (ŠM)

Ovaj metod se zasniva na sabijanju serije cilindričnih priprema sa različitim odnosom dimenzija pri čemu je prečnik fiksiran, na način kako je to dato u Tački 3.7.3. Početne dimenzije su usvojene u skladu sa preporukom i date su u Tabeli 6.4. Primjer određivanja krive ojačavanja Šofmanovim metodom biće dat za leguru AlMgSi0,5 na sobnoj temperaturi. Dijagrami promjene sile u funkciji hoda dati na Slici 6.7.

Tabela 6.4. Dimenzije i brojevi komada priprema za ŠM

	d_0 [mm]	h_0 [mm]	Komada
Pb	33.4	10	1
		15	1
		20	1
AlMgSi0,5	33.4	10	4
		15	4
		20	4

Slika 6.7. Promjene sile sabijanja kod ŠM za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C]

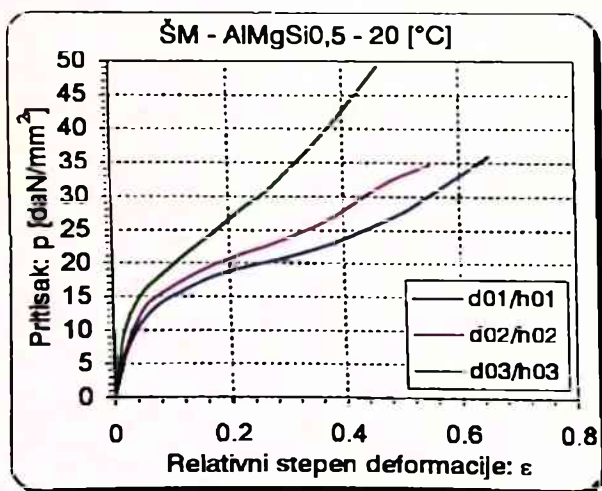
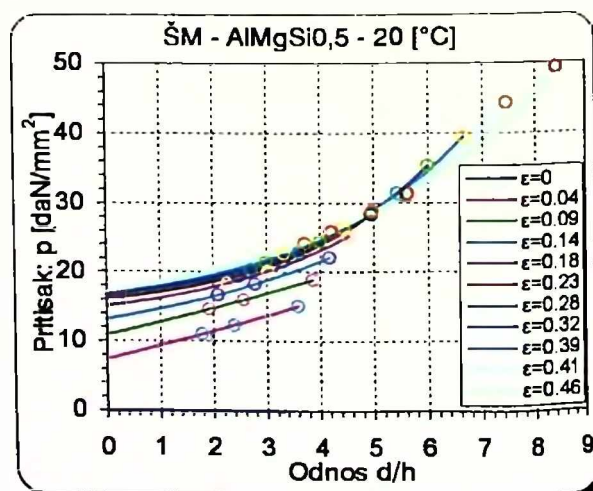
Na osnovu veze (3.68) dobija se srednji pritisak u zavisnosti od stepena deformacije i daje na Slici 6.8. a od odnosa d_0/h_0 na Slici 6.9. Ovdje se dobijaju po tri tačke krive za tri početna odnosa prečnika i visine za veće stepene deformacije.

Tačke krivih za pojedine stepene deformacije se ekstrapoliraju do ordinate kako bi se aproksimiralo sabijanje bez uticaja trenja. Najpogodnija funkcija za ekstrapolaciju je eksponencijalna funkcija oblika:

$$p = a_1 + a_2 e^{a_3 \frac{d}{h} + a_4} \quad (6.1)$$

Određivanje parametara u izrazu (6.1) je vršeno pomoću softverskog paketa za statističku obradu podataka - STATISTICA for Windows Release 5.0, koja ima više modula od kojih se koristi modul nelinearne

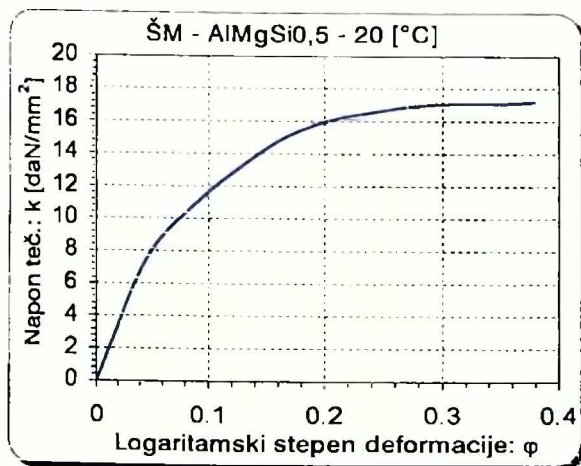
aproksimacije (Nonlinear Estimation). Ovaj modul vrši regresionu analizu pomoću unaprijed zadatih funkcija, a takođe daje mogućnost korisniku da na proizvoljan način zada funkciju (User-specified Regression) regresije. U ovom slučaju zadaje se funkcija oblika (6.1) i od više ponuđenih metoda koristi se Quasi-Newton-ov metod. Dobijeni parametri dati su u Tabeli 6.5.

Slika 6.8. Promjene radnog pritiska kod ŠM za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C]Slika 6.9. Promjena pritiska od odnosa d/h kod ŠM za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C]

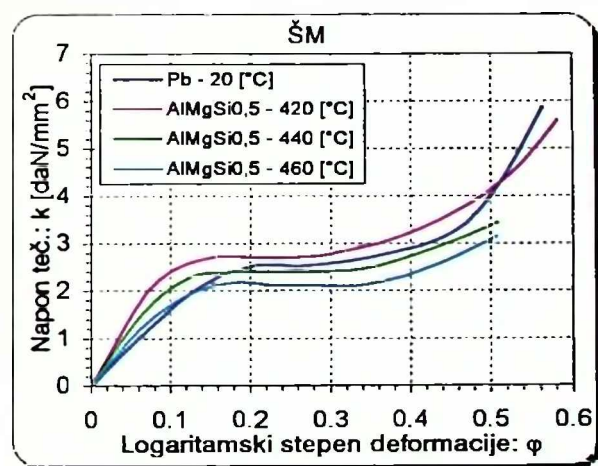
Ekstrapolirane vrijednosti na ordinati predstavljaju vrijednosti napona tečenja i odgovarajućim stepenima deformacije daju krive ojačavanja (Slika 6.10.). Za ostale uslove deformisanja krive ojačavanja dobijene Šofmanovim metodom date su na Slici 6.11.

Tabela 6.5. Parametri ekstrapolacionih funkcija (5.27) kod ŠM za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C]

ε	a_1	a_2	a_3	a_4
0	0	0	0	0
0.046	-22.61109764582060	10.704977458703300	0.0636229528581400	1.031191369008410
0.092	-16.13320663548740	2.273483293757470	0.0670370510924096	2.475752759076630
0.138	6.84362741007056	0.869990908399937	0.2098904254973910	1.988729834964700
0.184	12.16036143238360	2.404905588685350	0.3293504463073520	0.200776536674850
0.230	14.06637619737100	0.585753359383604	0.3945102166382480	1.244673995731140
0.276	14.58254173375340	0.336283194284306	0.3908130967199370	1.791638862406010
0.322	14.69614857591800	0.822082400531903	0.3734813265077890	0.986119742203719
0.368	14.39962873607800	0.468694496822048	0.3351985872890000	1.751188643582150
0.414	13.26960230397140	0.541587938637041	0.2808370685176430	1.956215048904770
0.460	12.08157355283650	0.533749427938308	0.2353901107972430	2.260670302814420



Slika 6.10. Kriva ojačavanja po ŠM-u za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C]



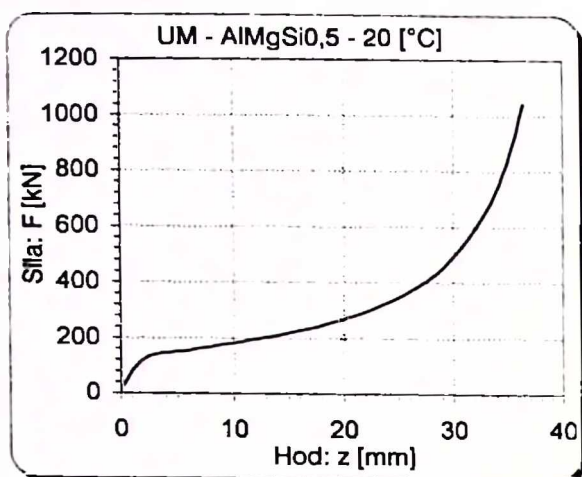
Slika 6.11. Krive ojačavanja po ŠM-u za ostale uslove deformisanja

6.4. ODREĐIVANJE KO UPROŠĆENIM METODOM (UM)

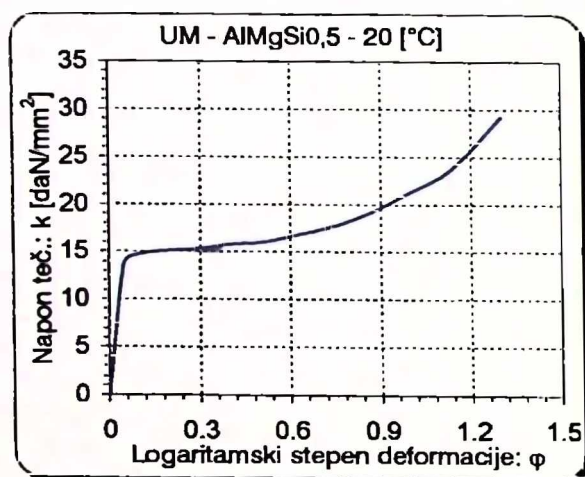
Uprošćeni metod je eksperimentalno teorijski metod i zahtijeva pored promjene sile i promjenu geometrije. Iz istog razloga kao kod MIZOD-a neophodno je uraditi po dva priprema za sve uslove deformisanja. Na jednom pripremu se mjeri promjena geometrije (Tabela 6.6.), a na drugom zavisnost sile u funkciji hoda. (Slika 6.12.).

Tabela 6.6. Promjena geometrije obradka kod UM za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C]

Faza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
d_g	33.40	34.18	34.92	35.95	37.52	39.50	41.85	45.75	51.48	58.45	60.30
d_d	33.40	34.08	34.70	36.10	37.76	39.65	42	45.60	51.32	58.44	59.81
d_{sr}	33.40	35.60	37.80	40.40	42.55	45.40	48.22	51.98	57.55	64.05	65.40
h	50	45.10	41	36.74	33.20	29.56	26	22.24	17.92	14.40	13.60

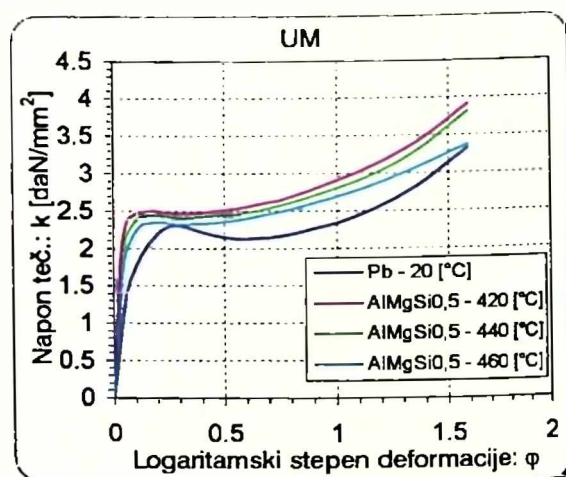


Slika 6.12. Sila sabijanja kod UM-a za AlMgSi_{0,5} na $t=20$ [°C]



Slika 6.13. Kriva ojačavanja po UM-u za AlMgSi_{0,5} na $t=20$ [°C]

Na osnovu izraza za napon tečenja (3.86) dobija se kriva ojačavanja data na Slici 6.13. Na Slici 6.14. su date krive ojačavanja za ostale uslove deformisanja.



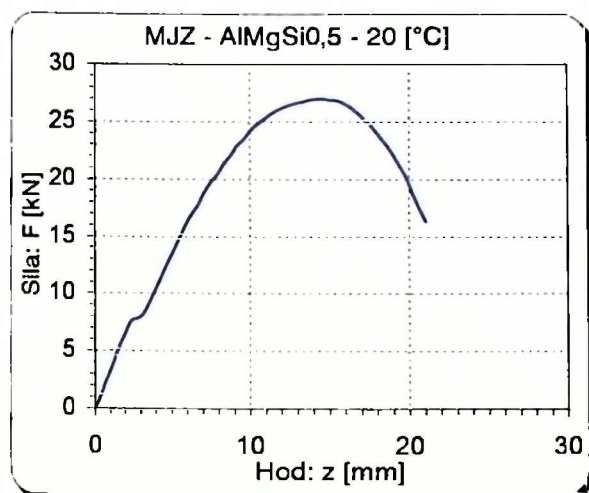
Slika 6.14. Krive ojačavanja po UM-u za ostale uslove deformisanja

6.5. ODREĐIVANJE KO METODOM JEDNOOSNOG ZATEZANJA (MJZ)

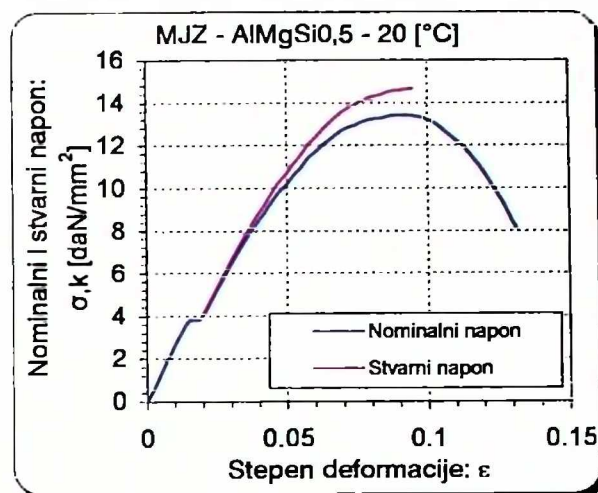
Za određivanje krive ojačavanja metodom jednoosnog zatezanja, koristi se standardna proporcionalna duga epruveta prečnika $\phi d_0=16$ [mm] i dužine $l_0=10d_0=160$ [mm] (Slika 3.17.). Ostale dimenzije epruvete su izabrane tako mogu zadovoljiti dimenzione zahtjeve mašine za ispitivanje, tj. da ima dovoljnu dužinu i prečnik "glave" kako bi mogla da se stegne u stezne čeljusti.

Metod jednoosnog zatezanja se najčešće koristi za ispitivanje u hladnom stanju, jer za ispitivanje u toplom stanju je neophodna dodatna oprema - komora za održavanje konstantnosti temperature u toku procesa ispitivanja, pa je ispitivanje izvođeno u hladnom stanju. Sa druge strane, za mekši materijal kakav je olovo, teško je izraditi epruvetu za ispitivanje, pa je ovim metodom vršeno ispitivanje samo legure AlMgSi_{0,5} na sobnoj temperaturi. Dobijeni dijagram sile u funkciji hoda dat je na Slici 6.15.

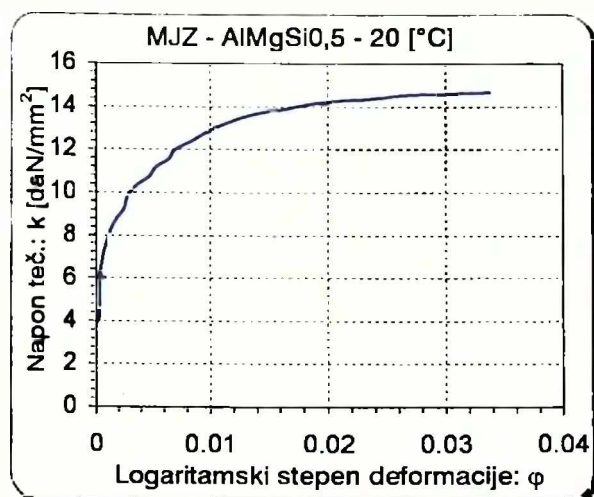
Pomoću izraza (3.87) do (3.89) dobija se promjena nominalnih i stvarnih napona od stepena deformacije, data na Slici 6.16. ili izdvojeno, kriva ojačavanja na Slici 6.17.



Slika 6.15. Sila istezanja kod MJZ za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C]



Slika 6.16. Nominalni i stvarni napon kod MJZ za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C]



Slika 6.17. Kriva ojačavanja kod MJZ za AlMgSi0,5 na $T=20$ [°C]

Sa Slike 6.17. se vidi da dobijena kriva ojačavanja važi za veoma mali stepen logaritamske deformacije, pa je kao takva praktično neupotrebljiva za veće stepene deformacije. S toga se nameće potreba za aproksimacijom dobijene krive ojačavanja tako da važi za veće stepene logaritamske deformacije. Aproksimacija, se može vršiti pomoću modela koje se često koriste u literaturi [19,91]. Oblici tih modela su:

$$k = c\varphi^n \quad (6.2)$$

$$k = c_0 + c_1\varphi^n \quad (6.3)$$

$$k = k_m \left(\frac{\varphi}{\varphi_m} \right)^{\varphi_m} \quad (6.4)$$

$$k = k_0 + (k_m + k_0) \left(\frac{\varphi}{\varphi_m} \right)^{\varphi_m} \quad (6.5)$$

gdje su:

a_1, a_2, a_3 - parametri stepenih funkcija koje najbolje aproksimiraju krivu ojačavanja,

k_0 - napon na granici tečenja,

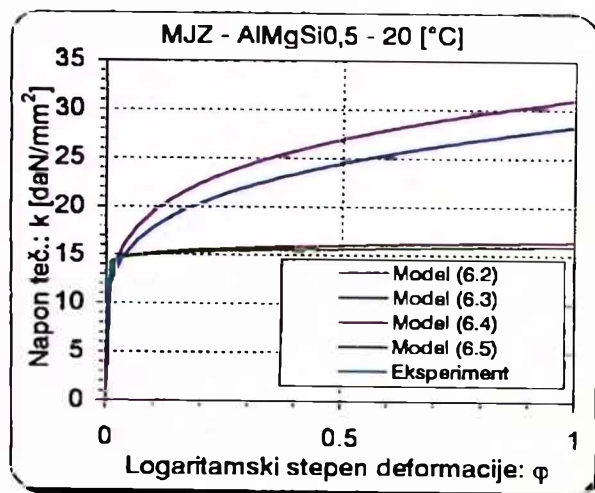
k_m - maksimalni napon tečenja,

φ_m - logaritamski stepen deformacije koji odgovara maksimalnom naponu tečenja

Određivanje parametara u izrazima (6.2) i (6.5) je vršeno pomoću softverskog paketa za statističku obradu podataka – *STATISTICA* i modula nelinearne aproksimacije (*Nonlinear Estimation*). U ovom slučaju zadaju se funkcije oblika (6.2) i (6.5) i koristi *Simplex* metod. Vrijednosti parametara modela dati su u Tabeli 6.7. Radi upoređenja daju se krive ojačavanja dobijene eksperimentalno putem MJZ i pomoću aproksimativnih funkcija na Slici 6.18.

Tabela 6.7. Parametri aproksimativnih funkcija (6.2) do (6.5)

Izraz	c_0	c	n	φ_m	k_0	k_m	R
(6.2)	-	30.97212	0.200934	-	-	-	0.959412
(6.3)	2.72972	31.90847	0.264184	-	-	-	0.975616
(6.4), (6.5)	-	-	-	0.0337	3.9139	14.6416	



Slika 6.18. Krive ojačavanja kod MJZ za veće stepene deformacije

Sa poslednje slike se vidi da krive oblika (6.2) i (6.3) daju nerealno velike vrijednosti napona tečenja za veće deformacije, dok su krive (6.4) i (6.5) daju realnije vrijednosti. Kako legura AlMgSi0,5 ima izraženu granicu tečenja kod ispitivanja zatezanjem (Slika 6.15.) to se usvaja najbliži oblik krive ojačavanja (6.5), i koristiće se kao kriva dobijena metodom jednoosnog zatezanja.

6.6. ANALIZA REZULTATA ODREĐIVANJA KRIVIH OJAČAVANJA

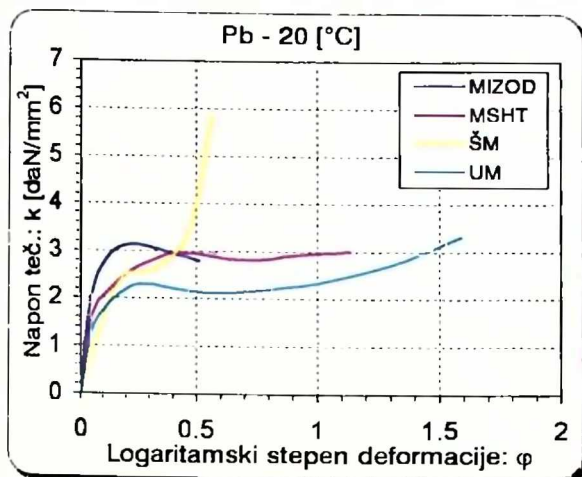
Dobijene krive ojačavanja na osnovu primijenjenih metoda za date uslove deformisanja (Slika 6.2., Slika 6.3., Slika 6.5., Slika 6.6., Slika 6.10., Slika 6.11., Slika 6.13., Slika 6.14., Slika 6.17. i Slika 6.18.) pokazuju odstupanja jednih od drugih. Odstupanja za različite uslove deformisanja su prirodna, ali odstupanja za iste uslove pokazuju da se radi o netačnostima pojedinih metoda. Ova odstupanja mogu se bolje sagledati ako se daju krive ojačavanja dobijene korišćenjem različitih metoda za iste uslove na jednom dijagramu.

Na Slici 6.19. do Slike 6.23. dat je pregled krivih ojačavanja dobijenih po različitim metodama za razne uslove deformisanja. Analizirajući navedene slike uočavaju se razlike među krivim ojačavanja. Te razlike se ogledaju u obliku krive, vrijednostima i intervalima logaritamskog stepena deformacije za koji su validne.

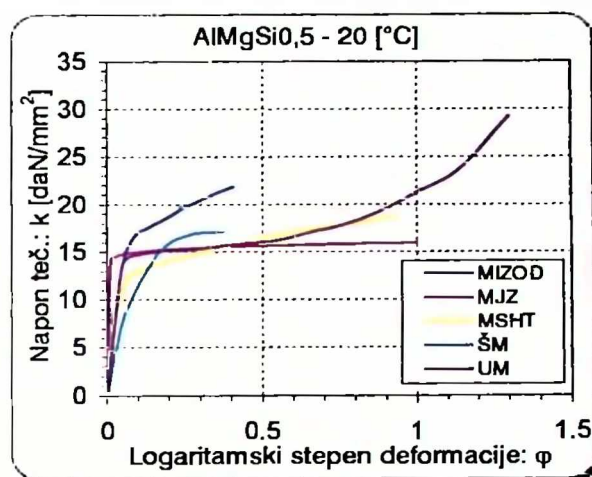
Najviše vrijednosti krivih ojačavanja se dobijaju po MIZOD-u. U početnom dijelu linearnih zavisnosti napona i deformacije vrijednosti dobijene UM-om su između MIZOD i ŠM vrijednosti. Pokazuje se poznati trend da sa porastom temperature specifični deformacioni otpor opada. Vrijednosti krivih ojačavanja olova na sobnoj temperaturi su približne vrijednostima legure AlMgSi0,5 u toplom stanju.

MIZOD pokazuje deformaciono omekšavanje za sve uslove deformisanja, osim za leguru AlMgSi0,5 u hladnom stanju. Za više stepene deformacije uprošćeni metod daje deformaciono ojačavanje.

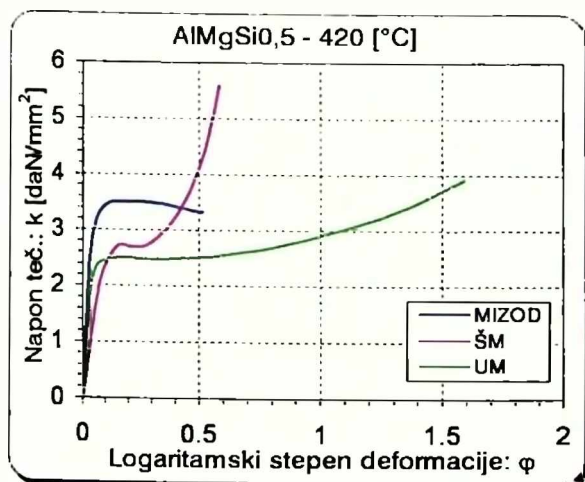
Šofmanovim metodom se dobija nagli rast krivih ojačavanja poslije $\varphi > \sim 0.3$ i očigledno je u pitanju nedostatak metoda. Kod legure AlMgSi0,5 oblast važenja je nešto veća i iznosi $\varphi < \sim 0.4$.



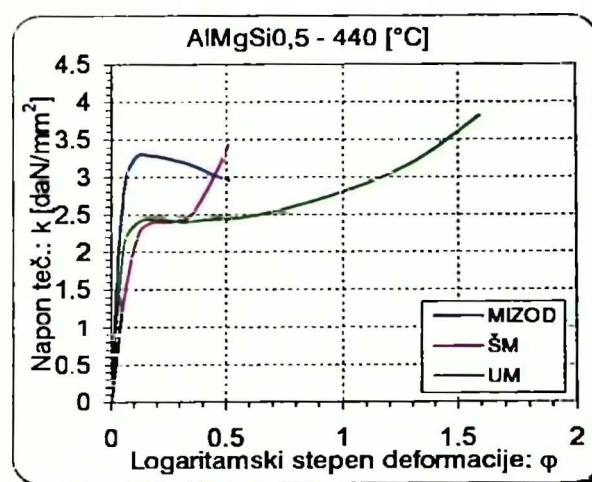
Slika 6.19. Krive ojačavanja
za olovo na $t = 20^\circ\text{C}$



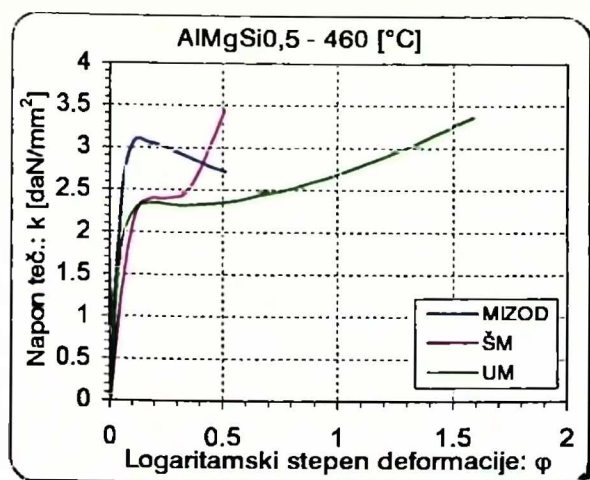
Slika 6.20. Krive ojačavanja
za AlMgSi0,5 na $t = 20^\circ\text{C}$



Slika 6.21. Krive ojačavanja
za AlMgSi0,5 na $t = 420^\circ\text{C}$



Slika 6.22. Krive ojačavanja
za AlMgSi0,5 na $t = 440^\circ\text{C}$



Slika 6.23. Krive ojačavanja
za AlMgSi0,5 na $t = 460^\circ\text{C}$

Oblast definisanosti krivih ojačavanja (važenja) je karakteristika metoda i razlikuje se od slučaja do slučaja. Najveći interval logaritamskog stepena deformacije je kod UM-a a najmanji, svakako, kod MJZ, pa je morao biti aproksimiran funkcijom (6.5).

6.7. REGRESIONA ANALIZA KRIVIH OJAČAVANJA

Kod krivih ojačavanja koje važe za manje stepene logaritamske stepene deformacije mora se vršiti aproksimacija funkcijama. U literaturi [19,25] se najčešće kod izotermnih procesa koristi oblik (3.91) kod kojega je napon tečenja funkcija stepena deformacije i brzine deformacije. Za neizotermne procese aluminijumskih legura je pogodno koristiti oblike (3.92) i (3.93), koji predstavljaju vezu napona tečenja od temperature i brzine deformacije. Kako je u definisanim uslovima ove Disertacije deformisanje sa niskim brzinama, ne uzima se u obzir uticaj brzine deformacije, poslednja dva izraza su nepogodni, pa će se koristiti izraz [73]:

$$k = k_0 + c\varphi^n \varphi^m e^{\frac{\Delta H}{RT_{abs}}} \quad (6.6)$$

Vrijednost za eksponent brzine deformacije (3.91), (3.92) i (3.93) i početnu deformaciju uzima se da $m=0$ i $k_0=0$, gdje se izraz (3.91) svodi na izraz (6.2), a izraz (6.6) na:

$$k = c\varphi^n e^{\frac{\Delta H}{RT_{abs}}} \quad (6.7)$$

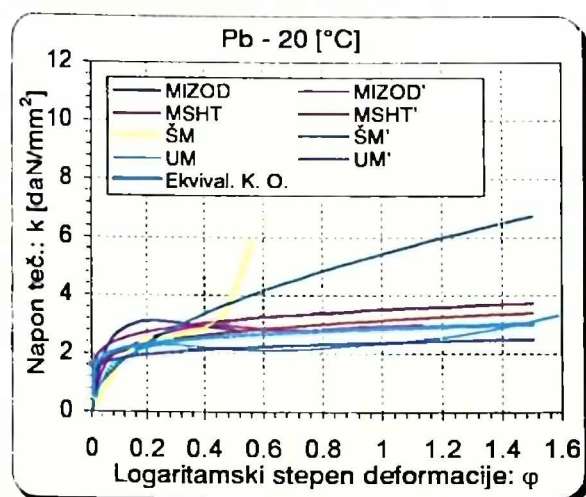
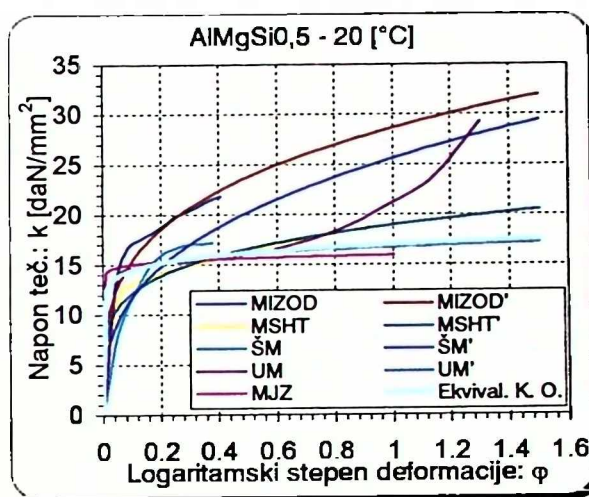
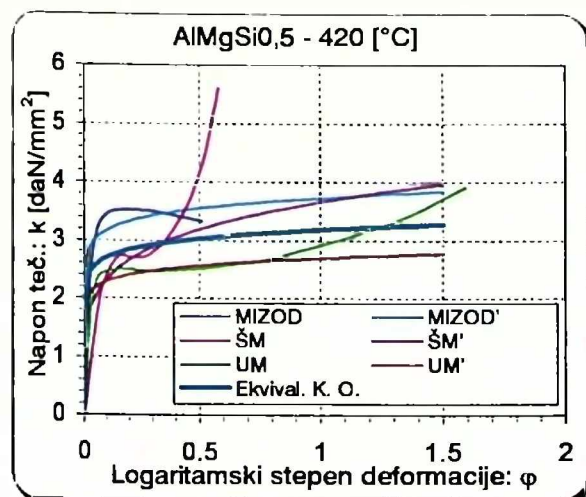
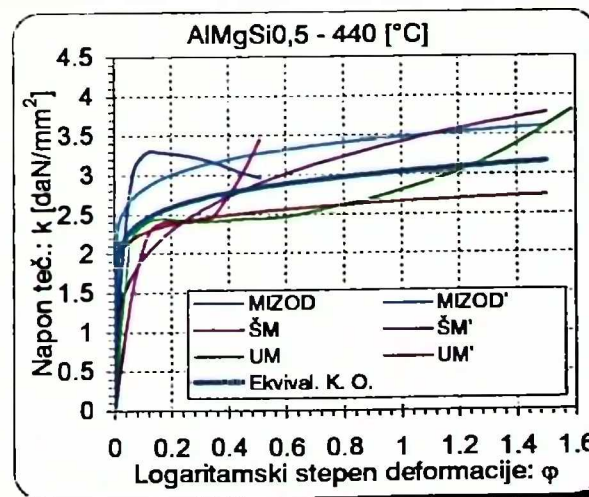
Korišćenjem pomenutog softverskog paketa STATISTICA izvršena je aproksimacija svih krivih ojačavanja, a dobijeni parametri funkcija i koeficijent korelacije R, dati su u Tabeli 6.8. Takođe su određene krive ojačavanja koje predstavljaju aproksimacije svih dobijenih krivih zajedno, tj. njihove ekvivalente, za pojedine uslove. Parametri ekvivalentnih krivih ojačavanja dati su u Tabeli 6.9., a dijagrami svih krivih date su na Slici 6.24. do Slike 6.28. i obilježeni su znakom ' ("prim") kako bi se razlikovali od eksperimentalno dobijenih. Za aproksimaciju krivih korišćen je *Simplex & Quasi-Newton*-ov metod.

Tabela 6.8. Parametri funkcija aproksimacije krivih ojačavanja

Materijal	Temperatura t [°C]	Metod	c	n	Koeficijent korelacije R
Pb	20	MIZOD	3.519324	0.156114	0.944962
		MSHT	3.156404	0.193512	0.968376
		SM	5.43487	0.52455	0.97457
		UM	2.38916	0.121411	0.96651
AlMgSi0,5	20	MIZOD	28.63777	0.270208	0.964697
		MSHT	18.94052	0.19231	0.986466
		SM	25.60558	0.3402	0.973799
		UM	16.752295	0.062775	0.999645
AlMgSi0,5	420	MIZOD	3.723873	0.071815	0.977562
		SM	3.653419	0.199151	0.994134
		UM	2.690832	0.070878	0.992105
	440	MIZOD	3.476441	0.090661	0.943429
		SM	3.418737	0.247689	0.985336
		UM	2.65558	0.06998	0.99317
	460	MIZOD	3.293226	0.115968	0.91853
		SM	3.418737	0.247689	0.985336
		UM	2.558201	0.081912	0.992579

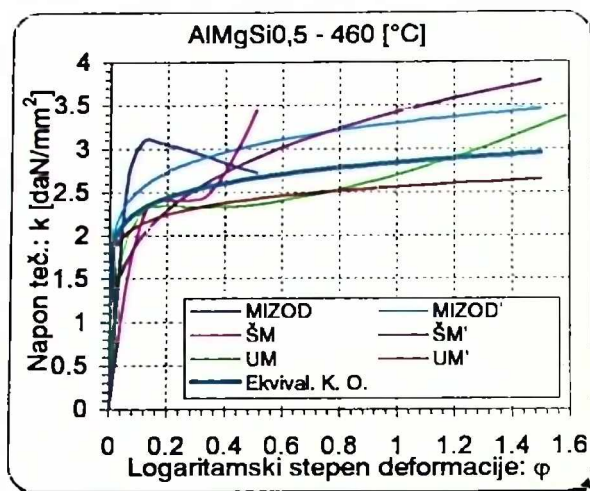
Tabela 6.9. Parametri funkcija ekvivalentnih krivih ojačavanja

Materijal	Temperatura t [°C]	c	n	Koeficijent korelacije R
Pb	20	2.874792	0.134144	0.883238
AlMgSi0,5	20	16.9709	0.068684	0.911298
	420	3.178335	0.071742	0.921686
	440	3.034434	0.097808	0.895958
	460	2.834984	0.093921	0.911298

Slika 6.24. Aproksimativne KO za olovo na $t=20$ [°C]Slika 6.25. Aproksimativne KO za leguru AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C]Slika 6.26. Aproksimativne KO za leguru AlMgSi0,5 na $t=420$ [°C]Slika 6.27. Aproksimativne KO za leguru AlMgSi0,5 na $t=440$ [°C]

Regresionom analizom je moguće dobiti zavisnosti napona tečenja od temperature i stepena deformacije za leguru AlMgSi0,5 preko zavisnosti (6.7). To je urađeno pomoću softverskog paketa STATISTICA korišćenjem *Rosenbrock & Quasi-Newton*-ovog metoda. Dobijeni parametri funkcija dati su u Tabeli 6.10., a trodimenzionalni dijagrami "površni"

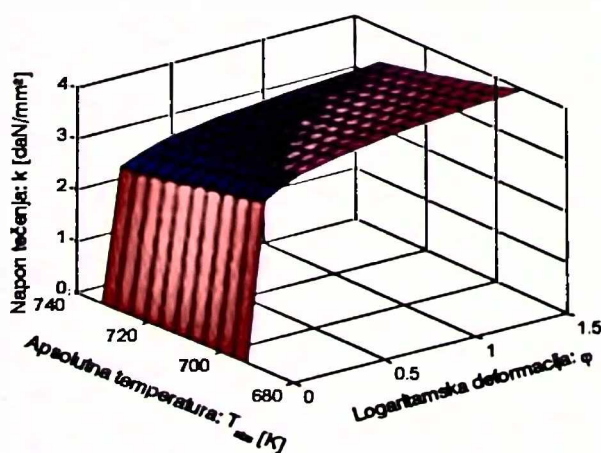
ojačavanja na Slici 6.29. do Slike 6.31. Takođe je određena aproksimacija vrijednosti napona tečenja dobijenih pomoću svih metoda i dobijena efektivna površ koja predstavlja mjeru srednje vrijednosti površi dobijenih za različite metode (Slika 6.32.).



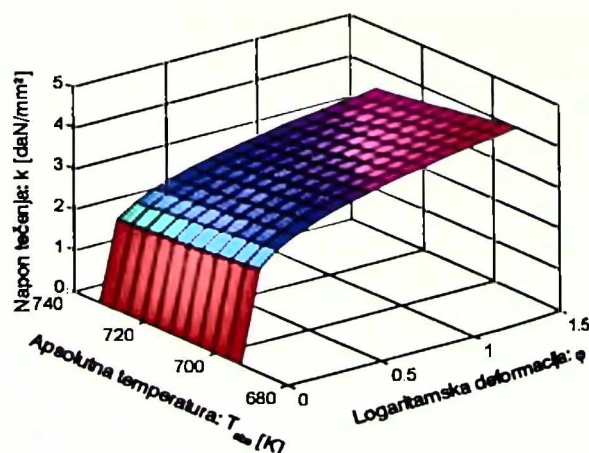
Slika 6.28. Aproksimativne KO za leguru AlMgSi0,5 na $t=460$ [°C]

Tabela 6.10. Parametri funkcija aproksimacije "površ" ojačavanja

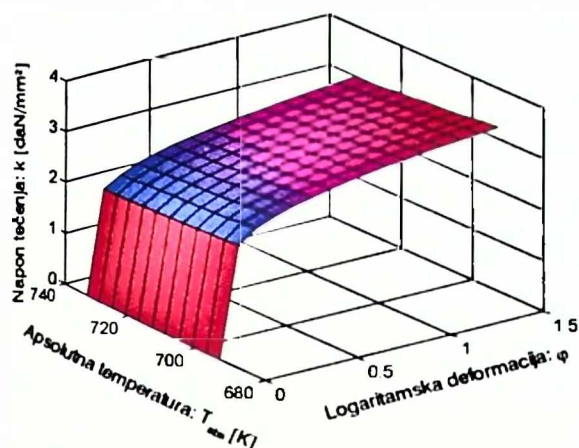
Metod	Temperatura	c	n	$\Delta H/R$	Koeficijent korelacije R
MIZOD	$t=(420 \div 460)$ [°C]	0.124044	0.090734	2376.625	0.950256
SM		0.237553	0.218575	1897.42	0.984662
UM		0.673418	0.146455	1045.2	0.955814
Ekvivalentna "površ" ojačavanja		0.276939	0.089788	1703.474	0.90243



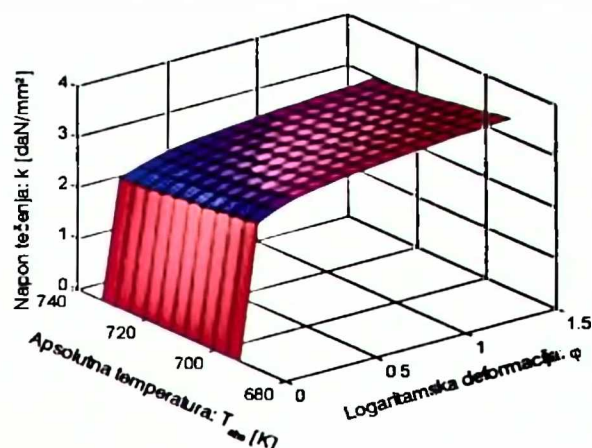
Slika 6.29. Aproksimativna "površ" ojačavanja legure AlMgSi0,5 po MIZOD na $t=(420 \div 460)$ [°C]



Slika 6.30. Aproksimativna "površ" ojačavanja legure AlMgSi0,5 po ŠM na $t=(420 \div 460)$ [°C]



Slika 6.31. Aproximativna "površ" ojačavnja legure AlMgSi0.5 po UM na $t=(420\div460)$ [°C]



Slika 6.32. Ekvivalentna "površ" ojačavnja legure AlMgSi0.5 na $t=(420\div460)$ [°C]

6.8. KRITIČKI OSVRT NA KORIŠĆENE METODE ODREĐIVANJA KRIVIH OJAČAVANJA

Na osnovu navedenih razlika u rezultatima određivanja krivih ojačavanja zaključuje se da korišćene metode nijesu apsolutno tačne, nego sa manjom ili većom tačnošću daju promjenu napona tečenja u funkciji parametara deformisanja, za određene uslove. Svi metodi imaju svoje prednosti i nedostatke.

Kod MIZOD i MSHT se na relativno jednostavan način postiže linijsko naponsko stanje, ali se ono za veće deformacije narušava. S druge strane izrada priprema je složenija, naročito kod MIZOD-a. MSHT je praktično nemoguće koristiti u toplom stanju bez dodatne opreme za održavanje temperature.

Šofmanov metod zahtijeva veći broj priprema pa samim tim i duže vrijeme istraživanja. Ekstrapolacija može proizvesti značajnu grešku, naročito za više stepene deformisanja.

Kod UM do greške dolazi usled aproksimacija koje se uvode radi jednostavnosti rešavanja sistema diferencijalnih jednačina, ali je moguće dobiti vrijednosti napona tečenja na relativno dugom intervalu stepena deformacije.

MJZ je moguće efikasno koristiti za manje stepene deformacije a za veće se koriste ekstrapolacije, što može prouzrokovati grešku. Metod je primjenljiv za manje brzine deformacije, uglavnom na sobnoj temperaturi. Na povišenim temperaturama neophodna je dodatna oprema.

Generalno se ne može reći koji metod je najtačniji. Za ozbiljnija istraživanja potrebno je imati što tačnije podatke svih ulaznih parametara procesa deformisanja, a naročito napona tečenja. Iz tog razloga se preporučuje određivanje krivih ojačavanja na osnovu više metoda i upoređenje dobijenih rezultata, kao što je to ovdje urađeno.

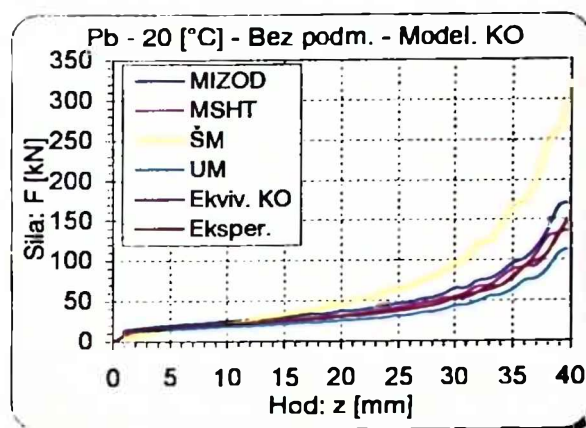
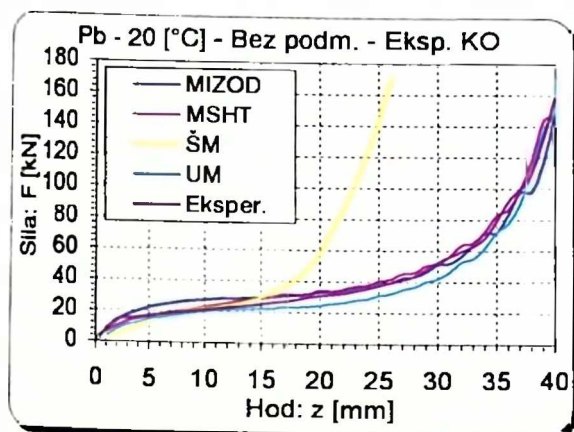
U cilju određivanja najboljih krivih ojačavanja za sve navedene uslove izvršeno je slobodno sabijanje priprema dimenzija: $\phi d_0 \times h_0 = 15.14 \times 50$ [mm]. Takođe su izvršene DEFORM simulacije za sve uslove i krive ojačavanja dobijene eksperimentalno i regresionom analizom. Primjer ulaznih podataka za olovo na sobnoj temperaturi: $t=20$ [°C] sa podmazivanjem za DEFORM simulaciju sa korišćenjem modelirane krive ojačavanja po MIZOD (Tabela 6.8.), dat je u Tabeli 6.11.

Tabela 6.11. Primjer ulaznih podataka kod DEFORM simulacije olova sa podmazivanjem

Simulation Controls	Simulation Parameters	Units UNIT			<input checked="" type="checkbox"/> SI		
		Geometry GEOTYP			<input checked="" type="checkbox"/> Axisymmetric		
	Step Controls	Number of simulation steps			NSTEP=1000		
		Step increment to save			STPINC=10		
		Primary die			PDIE(1)=1		
		Steps by			<input checked="" type="checkbox"/> Stroke		
		Stroke per step			DSMAX=0.1 [mm]		
Stopping Controls	Primary die displacement			SMAX=0,40.0000 [mm]			
Material Properties	Flow Stress data	Constant			(C)= 35.19324[MPa]		
		Strain exponent			(n)= 0.156114		
Objects	Name: Gornji alat <input checked="" type="checkbox"/> Rigid	Geometry		X [mm]	Y [mm]	R [mm]	
			1	0	50.00	0	
			2	45.00	50.00	1	
		Movement controls				Speed: 2 [mm/s]	
						Angle: -90°	
		Name: Donji alat <input checked="" type="checkbox"/> Rigid	Geometry		X [mm]	Y [mm]	R [mm]
	1			45.00	0	0	
	2			0	0	0	
	Name: Pripremak <input checked="" type="checkbox"/> Plastic		Geometry		X [mm]	Y [mm]	R [mm]
		1		0	0	0	
		2		15.14	0	0	
		3		15.14	50.00	0	
		4	0	50.00	0		
Mesh		Number of mesh elements		MGNELM=1000			
Inter Object Interface	Gornji kalup - - Pripremak	Contact relation CNTACT			<input checked="" type="checkbox"/> Master-Slave		
		Friction model FRCFAC			Shear		
		Friction			FRCFAC=0.114		
	Donji kalup - - Pripremak	Contact relation CNTACT			<input checked="" type="checkbox"/> Master-Slave		
		Friction model FRCFAC			Shear		
		Friction			FRCFAC=0.114		

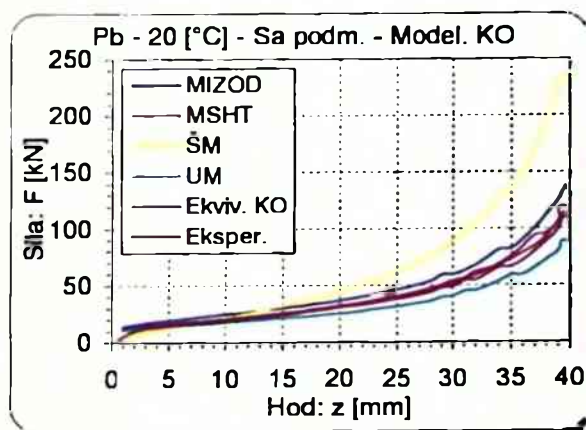
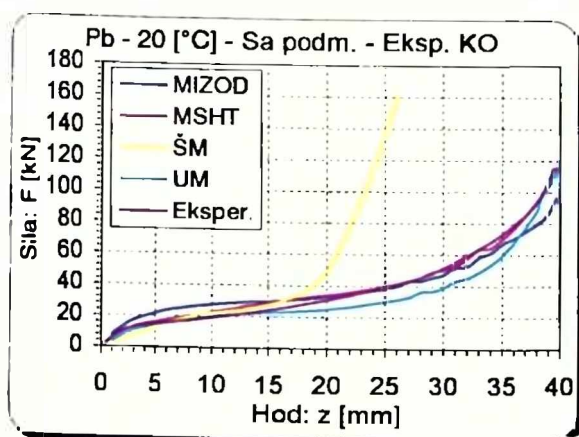
Nakon izvršenih DEFORM simulacija na Slici 6.33. do Slike 6.39. su dati dobijeni dijagrami deformacionih sila za sve uslove deformisanja korišćenjem eksperimentalno i modelski dobijene krive ojačavanja. Analiza navedenih dijagrama daje mogućnost da se odredi koje krive ojačavanja za određene uslove će se koristiti u DEFORM simulacijama.

Kod slobodnog sabijanja priprema od olova bez podmazivanja na sobnoj temperaturi (Slika 6.33.-a), najbolje poklapanje deformacione sile dobijene DEFORM simulacijom i eksperimentom, je korišćenjem krive ojačavanja po MSHT i MIZOD za drugu polovinu procesa deformisanja. Za manje i veće stepene deformisanja to je KO dobijena po UM, koja ima izvjesno odstupanje za srednje vrijednosti stepena deformisanja. Najveće razilaženje rezultata je korišćenjem ŠM za veće stepene deformisanja, zbog naglog skoka krivih ojačavanja. Kod korišćenja modelskih KO (Slika 6.33.-b) skoro potpuno poklapanje je dobijeno za korišćenje modela ekvivalentne KO, a takođe je veoma dobro poklapanje i za KO po MSHT.



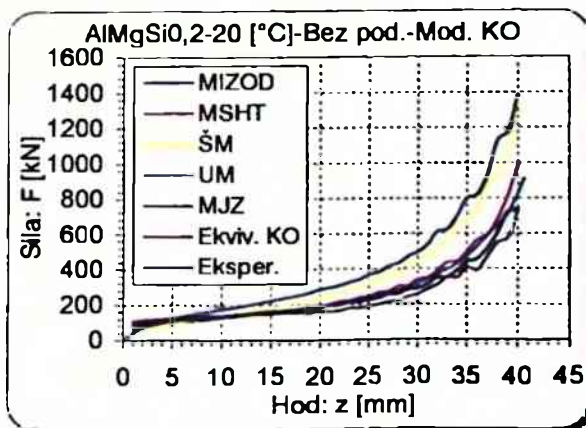
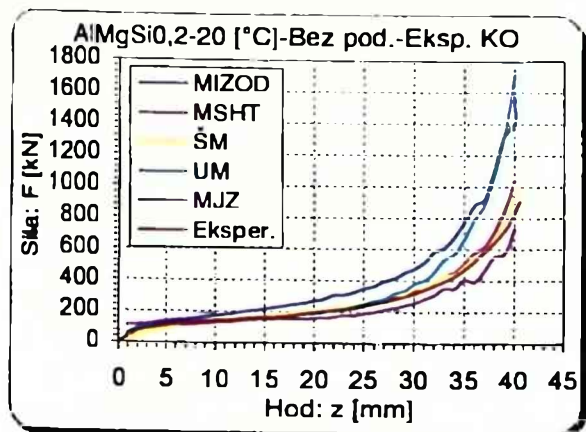
a) b)

Slika 6.33. Sile dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom slobodnog sabijanja priprema od olova bez podmazivanja na $t=20$ [°C], korišćenjem:
a) eksperimentalnih KO i b) modelskih KO



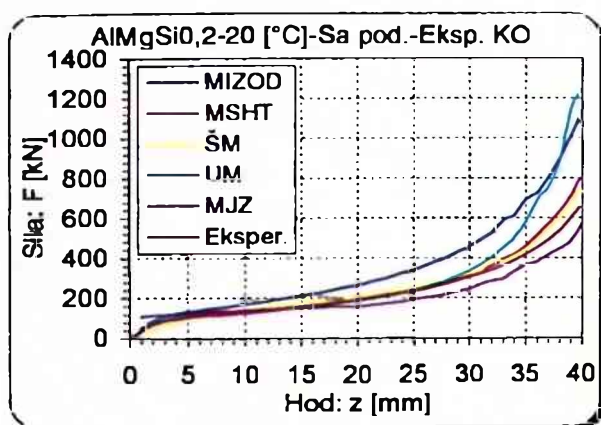
a) b)

Slika 6.34. Sile dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom slobodnog sabijanja priprema od olova sa podmazivanjem na $t=20$ [°C], korišćenjem:
a) eksperimentalnih KO i b) modelskih KO

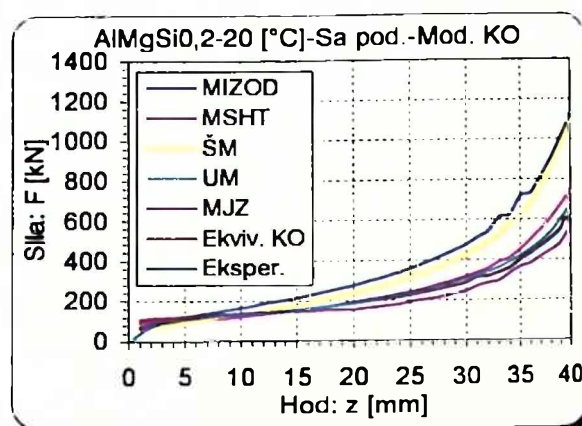


a) b)

Slika 6.35. Sile dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom slobodnog sabijanja priprema od legure AlMgSi_{0,5} bez podmazivanja na $t=20$ [°C], korišćenjem:
a) eksperimentalnih KO i b) modelskih KO



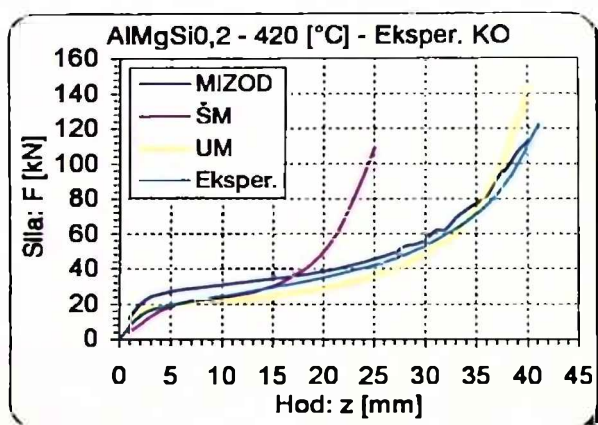
a)



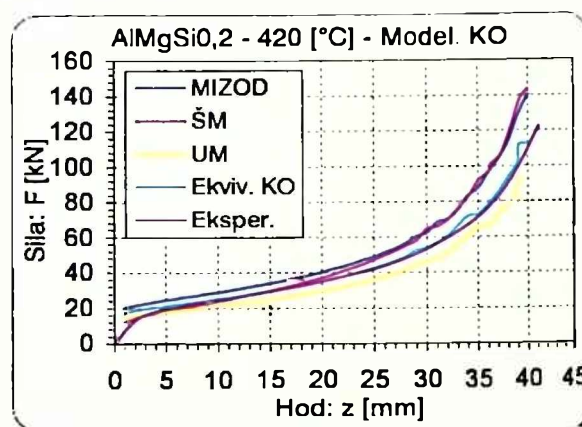
b)

Slika 6.36. Sile dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom slobodnog sabijanja priprema od legure AlMgSi0,5 sa podmazivanjem na $t=20$ [°C], korišćenjem:

a) eksperimentalnih KO i b) modelskih KO



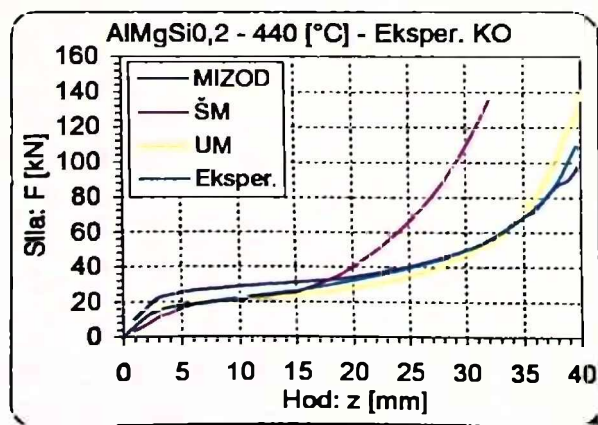
a)



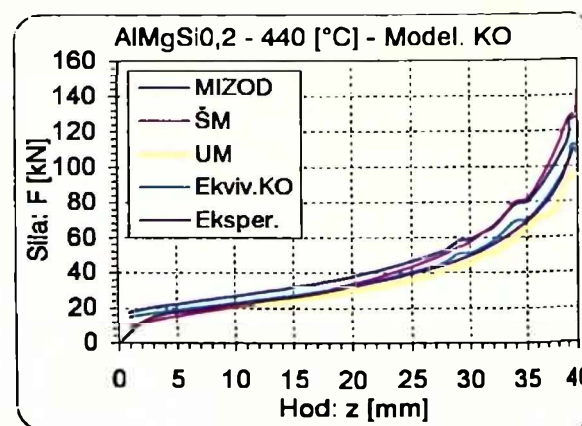
b)

Slika 6.37. Sile dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom slobodnog sabijanja priprema od legure AlMgSi0,5 sa podmazivanjem na $t=420$ [°C], korišćenjem:

a) eksperimentalnih KO i b) modelskih KO



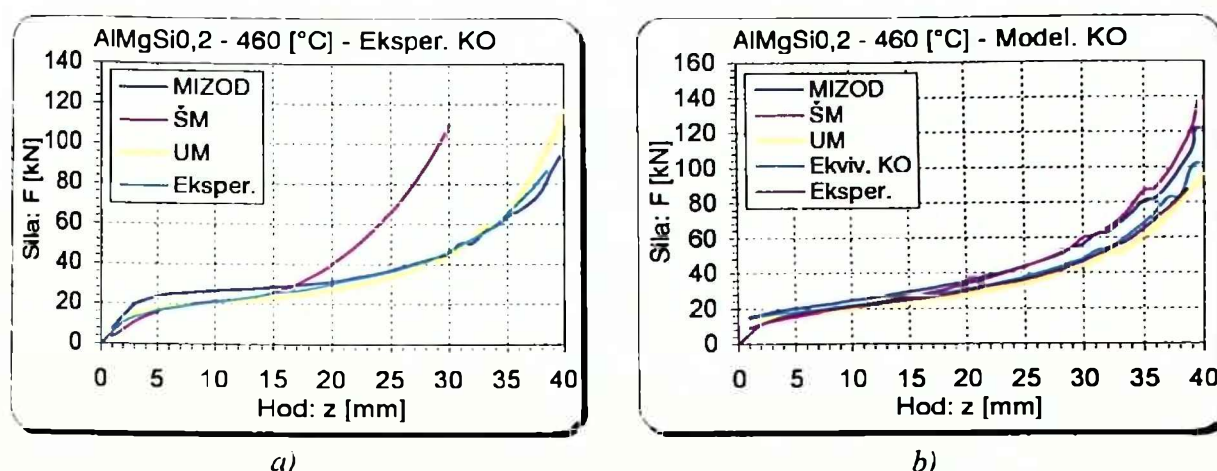
a)



b)

Slika 6.38. Sile dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom slobodnog sabijanja priprema od legure AlMgSi0,5 sa podmazivanjem na $t=440$ [°C], korišćenjem:

a) eksperimentalnih KO i b) modelskih KO



Slika 6.39. Sile dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom slobodnog sabijanja priprema od legure AlMgSi0,5 sa podmazivanjem na $t=460$ [°C], korišćenjem:
a) eksperimentalnih KO i b) modelskih KO

DEFORM simulacija slobodnog sabijanja olova na sobnoj temperaturi sa podmazivanjem, najbolje poklapanje vrijednosti deformacione sile sa eksperimentalno dobijenim vrijednostima, daje za korišćenje krive ojačavanja po MSHT (Slika 6.34.-a), naročito za vrijednosti druge polovine stepena deformisanja, a UM za niže vrijednosti. Kod korišćenja modelskih KO najbolji rezultati se dobijaju za model krive ojačavanja po MSHT i za model ekvivalentne krive ojačavanja (Slika 6.34.-b). Najveće razilaženje vrijednosti radne sile se dobija korišćenjem ŠM zbog naglog rasta napona tečenja u drugom dijelu krive (Slika 6.11., Slika 6.19., Slika 6.24.).

Kada je u pitanju sabijanje priprema od legure AlMgSi0,5 na sobnoj temperaturi, najbolje rezultate daje simulacija sa krivom ojačavanja po MSHT i ŠM (Slika 6.35.-a i Slika 6.36.-a). Kod krive ojačavanja po ŠM korišćen je prvi dio krive prije naglog rasta napona tečenja. Za manje vrijednosti stepena deformacije dobre rezultate daju krive ojačavanja po UM. Najveće odstupanje je dobijeno za drugu polovinu vrijednosti stepena deformacije korišćenjem krive ojačavanja po UM, a po MIZOD za sve vrijednosti stepena deformacije. Najbolje poklapanje korišćenjem modelskih vrijednosti KO je na osnovu modela dobijenog za MSHT i UM, a takođe i za model ekvivalentne krive ojačavanja (Slika 6.35.-b i Slika 6.36.-b), dok je najveće razilaženje korišćenjem modela za ŠM i MIZOD.

DEFORM simulacija tople obrade legure AlMgSi0,5 na $t=(420,440,460)$ [°C] daje najbolje poklapanje deformacione sile sa eksperimentalno izmjerenim vrijednostima korišćenjem krive ojačavanja po MIZOD za drugu polovinu stepena deformisanja i ŠM za manje vrijednosti (Slika 6.37.-a do Slike 6.39.-a). Najveće odstupanje je korišćenjem ŠM za veće stepene deformisanja. Kod korišćenja modelskih vrijednosti krivih ojačavanja najbolji rezultati su po modelu za UM i model ekvivalentne krive ojačavanja (Slika 6.37.-b do Slike 6.39.-b). Takođe, velika odstupanja postoje kod korišćenja krive ojačavanja po ŠM za veće stepene deformacije.

Na osnovu prethodne analize generalno se može reći da je u numeričkim simulacijama procesa deformisanja za navedene uslove, najbolje koristiti krive ojačavanja dobijene po MSHT za hladnu obradu i UM za toplu obradu, ili modele ovih krivih ojačavanja. Modelska vrijednost ekvivalentne krive ojačavanja, koja predstavlja srednju krivu ojačavanja, može se uspješno koristiti u numeričkim simulacijama. U DEFORM simulacijama za uslove deformisanja koji su ovdje dati, dobijeni su najtačniji rezultati upravo korišćenjem modela ekvivalentnih krivih ojačavanja.

Na Slici 6.33. do Slike 6.39. primjećuje se da je bolje poklapanje deformacione sile dobijene eksperimentalno i DEFORM simulacijama korišćenjem modelskih vrijednosti KO nego vrijednosti dobijenih po odgovarajućim metodima. Kod malih vrijednosti stepena deformisanja,

tj. na samom početku procesa, bolje poklapanje sila je za korišćenje eksperimentalno dobijenih krivih ojačavanja, međutim, poznavanje tačne vrijednosti deformacione sile na samom početku procesa deformisanja je od manjeg značaja za analizu naponsko deformacionog stanja obradka kod zapreminskog deformisanja. Zbog jednostavnosti unošenja podataka kod numeričkih FEM simulacija, preporučuje se korišćenje modelskih vrijednosti krivih ojačavanja, pa se u ovom radu koriste modeli ekvivalentnih KO.

7. ZAPREMSKO DEFORMISANJE U OTVORENIM KALUPIMA

7.1. METOD FIZIČKE DISKRETIZACIJE (MFD)

Osnova za određivanje naponsko deformacionih parametara u svakoj tački zapremine obradka jeste poznavanje pomjeranja tačaka. Određivanje pomjeranja tačaka zapremine mnogi autori su radili na različite načine, u zavisnosti od vrste procesa deformisanja, naponskog stanja i drugih mogućnosti [80,83,92]. Kada su u pitanju procesi osnosimetričnog deformisanja dovoljno je poznavati pomjeranja tačaka u meridijalnoj ravni, pa se najčešće vrši izrada pripremak iz dvije polovine i nanošenja mjerne mreže na meridijalnoj ravni. Ovaj postupak je pogodan kod procesa u kojima vlada naponsko stanje na pritisak, kao što su procesi istosmjernog, suprotnosmjernog ili kombinovanog istiskivanja, proces vučenja, dok kod procesa deformisanja u otvorenim kalupima ima ograničenu primjenu. To je posledica toga što se u pojedinim fazama procesa deformisanja u otvorenim kalupima javljaju obodni naponi na istezanje, koji vrše razdvajanje polovina pripremk i dovode do deformisanja koje ne odgovara deformisanju kompaktnog pripremk.

Iz navedenog razloga, pristupilo se izradi segmentnih pripremak (Slika 4.9.) kod kojih se nakon deformisanja može odrediti pomjeranje pojedinih tačaka zapremine. Pripremk napravljeni od osnosimetričnih žljebastih pločica opterećeni obodnim naponom na istezanje ponašaju se identično kao kompaktni. Ovako napravljeni pripremk omogućuju da se nakon izvršenog deformisanja, pogodnom pripremom obradaka, odrede pomjeranja. Kako se za određivanje naponsko deformacionog stanja koriste segmentni pripremk od žljebastih ploča, dakle, pripremk se fizički diskretizuje, to je ovaj metod nazvan metodom fizičke diskretizacije (MFD), koji je prezentiran na primjeru naponsko deformacione analize obradka u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 18 (Tabela 4.1.).

7.1.1. Određivanje deformacija

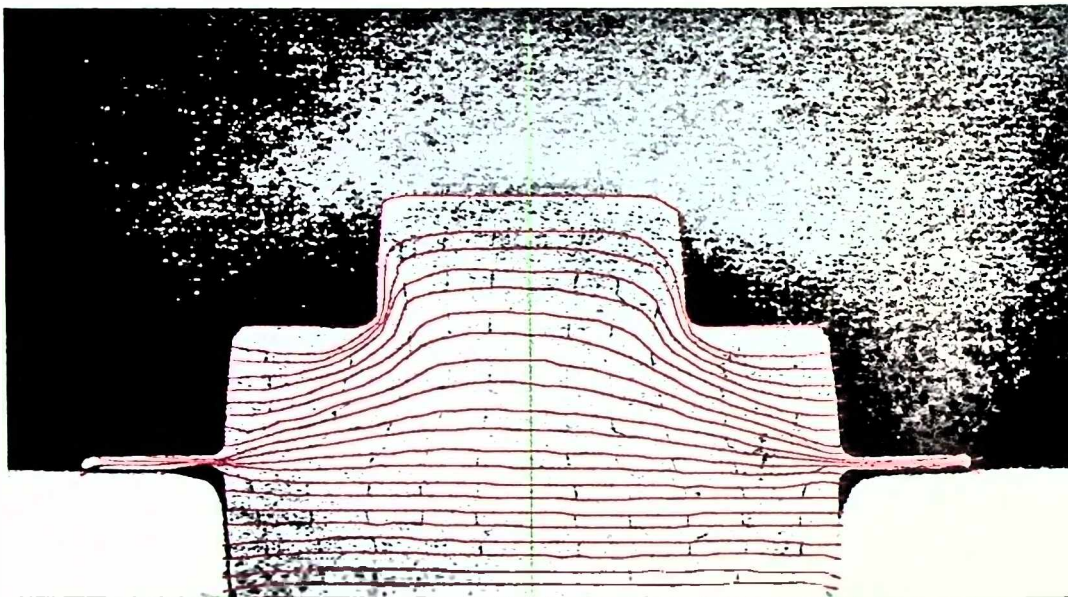
Mjerenja deformisane mreže digitalizovane slike presjeka obradka, čije dobijanje je opisano u Tački 4.7.2. vršena su na računaru u *Microsoft Excel*-u - standardnom programu paketa *Microsoft Office*. Najprije su napravljene proizvoljne prave linije čije se tačke dovode do poklapanja sa linijama deformisane mreže, uz uvećanje od 400%, koje je dovoljno da se poklapanje izvrši sa velikom preciznošću.

Posebno su vršena određivanja linija deformisane mreže koje su prethodno bile normalne na osu obradka, a posebno linija prethodno paralelnih osi obradka, tj. deformisanih radijalnih i aksijalnih linija mreže. Postavljene deformisane radijalne i aksijalne linije mreže date su na Slici 7.1. i Slici 7.2.

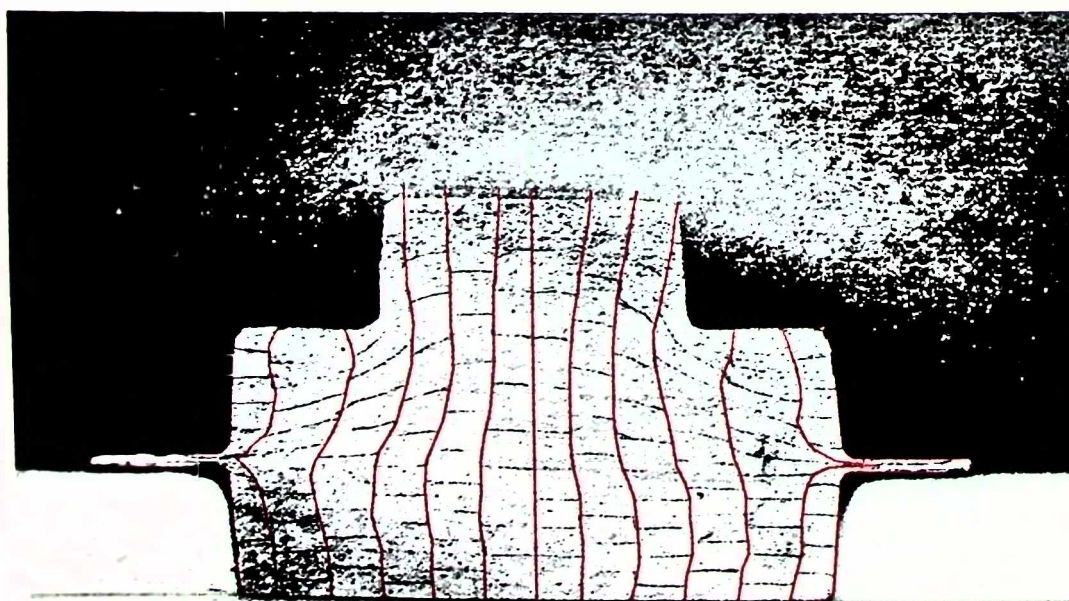
Sve linije u aksijalnom ili radijalnom pravcu, radi kasnije lakše obrade, su sa istim brojem tačaka, iako bi za linije sa manjom zakrivljenošću bilo potrebno manje tačaka. Potrebno je bilo uzeti dovoljno tačaka da se i zakrivljenosti sa malim radijusom mogu aproksimirati na dovoljno dobar način. To znači da se u zonama malih radijusa postavljaju tačke dovoljno bliske da se dobije izlomljena linija koja, kada se u proračunima interpolira kubnom interpolacijom, ne izlazi

iz pojasa debljine deformisane linije mreže pri navedenom uvećanju. Na taj način se došlo do optimalnog broja tačaka deformisanih linija mreže i on je za radijalne linije $j_r=41$, a za aksijalne $i_z=20$.

Postavljene su sve unutrašnje linije kao i konturne linije u radijalnom i aksijalnom pravcu. Broj deformisanih radijalnih linija i_r i deformisanih aksijalnih linija j_z se razlikuje u zavisnosti od dimenzija priprema karakterističnih za pojedine tačke eksperimentalnog plana. Vrijednosti koordinata tačaka deformisanih radijalnih linija dati su u Tabeli 7.1. i Tabeli 7.2., a vrijednosti koordinata tačaka deformisanih aksijalnih linija u Tabeli 7.3 i Tabeli 7.4. Tačke i linije u navedenim tabelama date su respektivno s lijeva u desno i odozgo nadolje.



Slika 7.1. Deformisane radijalne linije mreže na kraju procesa deformisanja



Slika 7.2. Deformisane aksijalne linije mreže na kraju procesa deformisanja

Tabela 7.1. Radijusi r_{bz} [mm] tačaka deformisanih aksijalnih linija

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_z=13$
1	-18.30	-16.08	-12.58	-8.33	-5.58	-2.08	0.00	3.97	7.00	9.62	13.23	15.95	18.21
2	-19.05	-16.75	-12.05	-8.33	-5.54	-2.15	0.00	3.65	6.30	9.38	13.02	16.69	18.92
3	-19.29	-17.17	-11.80	-8.33	-5.51	-2.22	0.00	3.37	5.84	9.16	12.52	17.01	19.20
4	-19.43	-17.17	-11.62	-8.33	-5.51	-2.29	0.00	3.16	5.59	8.92	12.35	17.22	19.45
5	-19.93	-16.82	-11.73	-8.26	-5.44	-2.32	0.00	2.98	5.35	8.78	12.52	17.50	20.16
6	-20.07	-17.17	-11.87	-8.19	-5.36	-2.39	0.00	2.66	5.28	8.35	12.59	17.50	20.30
7	-20.39	-17.50	-12.12	-8.12	-5.29	-2.47	0.00	2.55	5.28	7.96	12.70	17.30	20.55
8	-20.78	-18.41	-12.29	-7.94	-5.29	-2.57	0.00	2.48	5.28	7.93	12.81	17.75	20.90
9	-28.59	-18.90	-12.54	-7.80	-5.29	-2.54	0.00	2.45	5.31	8.03	12.95	18.43	28.04
0	-29.08	-19.47	-12.86	-7.84	-5.22	-2.50	0.00	2.45	5.45	8.49	13.19	19.73	28.36
11	-29.15	-18.83	-13.25	-7.91	-5.22	-2.54	0.00	2.45	5.56	8.74	13.44	22.53	28.54
12	-28.84	-18.30	-13.85	-8.37	-5.44	-2.64	0.00	2.59	5.81	9.06	13.72	19.35	28.43
13	-20.81	-18.06	-14.38	-9.04	-5.89	-2.82	0.00	2.91	6.23	9.34	13.83	18.43	28.11
14	-20.35	-17.81	-14.59	-10.14	-6.32	-3.17	0.00	3.01	6.48	9.94	13.80	17.97	20.76
15	-20.11	-17.56	-14.56	-10.49	-7.00	-3.46	0.00	2.94	6.62	10.15	13.83	17.61	20.30
16	-19.96	-17.31	-14.27	-10.56	-7.15	-3.46	0.00	3.05	6.83	10.23	14.00	17.50	20.02
17	-19.58	-17.17	-14.00	-10.67	-7.03	-3.60	0.00	3.19	6.80	10.33	14.00	17.58	19.98
18	-19.40	-17.24	-13.64	-10.07	-6.78	-3.35	0.00	3.16	6.65	10.37	13.58	17.26	19.52
19	-19.12	-16.78	-13.57	-10.10	-6.88	-3.42	0.00	3.05	6.48	9.87	13.37	16.91	19.10
$i_z=20$	-18.23	-16.54	-13.50	-9.96	-6.74	-3.35	0.00	2.94	6.30	9.84	13.27	16.73	18.11

Tabela 7.2. Visine z_{bz} [mm] tačaka deformisanih aksijalnih linija

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_z=13$
1	21.30	21.38	21.30	31.35	31.39	31.43	31.35	31.27	31.24	30.46	21.34	21.58	21.34
2	20.65	20.32	20.12	30.09	29.36	29.85	29.07	28.66	26.87	28.46	18.65	19.87	20.85
3	20.32	19.14	19.24	28.87	27.61	27.89	28.14	26.96	24.68	26.96	17.31	18.65	20.44
4	19.79	17.68	18.41	27.44	26.71	27.00	27.44	25.04	22.97	25.57	16.54	17.72	19.79
5	11.98	15.64	17.80	26.47	25.98	25.94	27.00	23.62	21.05	24.55	15.36	16.33	11.94
6	11.57	13.28	17.43	25.29	25.04	24.88	25.50	21.66	19.24	22.44	14.46	15.15	11.53
7	11.21	12.51	16.41	24.00	23.54	23.82	24.00	20.04	17.35	20.69	13.40	13.61	11.24
8	11.00	11.57	15.48	22.50	22.50	22.07	22.50	17.76	15.68	19.51	12.47	12.34	11.00
9	11.00	11.00	14.30	21.00	21.00	20.36	21.00	15.48	14.09	17.88	11.61	11.53	11.00
0	10.72	10.55	13.53	19.34	19.18	19.18	19.50	13.73	12.39	15.36	10.76	10.84	10.92
11	10.27	9.94	12.59	18.00	17.51	18.00	18.00	11.86	11.29	13.97	10.03	10.47	10.59
12	10.00	9.21	11.45	16.05	15.89	16.58	16.84	10.11	10.07	12.43	8.89	10.35	10.19
13	10.00	8.28	10.43	13.40	13.73	14.54	14.74	8.80	8.93	10.35	8.07	9.74	10.00
14	9.90	6.97	9.37	11.29	12.63	12.63	12.63	7.75	7.95	8.97	6.81	9.05	10.00
15	9.74	5.59	8.36	9.98	10.53	10.53	10.53	7.09	6.40	7.83	5.63	7.83	9.78
16	9.33	4.45	6.48	7.79	8.42	8.32	8.42	5.71	4.04	6.32	4.57	6.08	9.09
17	1.27	3.24	5.30	6.32	6.32	6.20	6.32	4.37	2.98	5.02	3.64	3.96	7.22
18	0.54	2.09	3.43	3.80	4.21	3.64	4.21	3.35	2.21	3.64	2.41	2.66	0.50
19	0.00	0.91	1.68	1.15	2.11	1.56	2.11	1.36	1.24	1.84	1.24	1.27	0.00
$i_z=20$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabela 7.3. Radijusi r_{br} [mm] tačaka deformisanih radialnih linija

$i=22$	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	$i \leftarrow 1$	
-18.23	-20.00	-20.00	-20.00	-20.00	-20.00	-20.00	-20.25	-20.49	-23.99	-29.12	-28.55	-25.97	-20.14	-20.14	-20.00	-20.00	-20.00	-20.00	-20.00	-19.79	-19.33	1	
-11.52	-19.00	-18.66	-19.00	-19.00	-19.00	-19.00	-19.00	-19.00	-22.86	-28.38	-27.85	-24.63	-19.00	-19.29	-19.00	-18.23	-19.00	-18.27	-16.50	-17.38	-11.06	2	
-10.88	-18.00	-17.81	-18.00	-18.00	-18.00	-18.00	-18.00	-18.00	-21.70	-27.95	-26.65	-21.10	-18.00	-18.73	-18.23	-17.28	-18.00	-16.99	-15.26	-15.90	-10.70	3	
-10.38	-17.00	-17.00	-17.00	-17.00	-17.00	-17.00	-17.00	-17.00	-20.35	-27.15	-24.91	-20.39	-17.00	-18.23	-17.00	-16.46	-17.00	-16.18	-14.34	-14.63	-10.28	4	
-9.85	-16.00	-16.00	-16.00	-16.00	-16.00	-16.00	-16.00	-16.00	-19.61	-24.60	-23.68	-19.58	-15.97	-17.84	-16.00	-15.47	-16.00	-15.62	-13.42	-13.57	-10.00	5	
-9.29	-15.00	-15.00	-15.00	-15.00	-15.00	-15.00	-15.00	-15.00	-17.91	-23.11	-21.84	-18.59	-15.00	-17.21	-14.87	-14.52	-14.77	-15.00	-12.47	-12.68	-9.92	6	
-8.62	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-16.32	-20.81	-20.21	-17.17	-14.00	-16.22	-13.25	-13.57	-13.53	-14.00	-11.59	-11.87	-9.54	7	
-7.87	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-14.70	-18.73	-19.22	-15.05	-13.00	-15.15	-11.80	-12.51	-12.22	-13.00	-10.74	-10.99	-9.32	8	
-7.20	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.29	-16.36	-17.21	-13.00	-12.00	-14.10	-10.99	-12.00	-11.30	-12.19	-10.17	-10.38	-8.90	9	
-6.74	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-13.92	-13.28	-11.00	-11.00	-12.82	-9.92	-11.00	-10.49	-11.48	-9.64	-9.92	-8.23	10	
-6.25	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-11.59	-10.00	-10.00	-10.00	-11.59	-9.08	-10.00	-9.57	-10.74	-9.32	-9.61	-7.66	11	
-5.79	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-10.10	-8.30	-9.00	-8.90	-9.71	-9.00	-9.50	-7.20	12	
-5.15	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.55	-7.70	-7.94	-8.48	-9.11	-8.86	-9.47	-6.71	13	
-4.27	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.38	-7.00	-7.31	-8.23	-8.72	-8.65	-9.29	-6.39	14	
-3.67	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.64	-6.11	-6.74	-8.02	-8.44	-8.55	-9.01	-6.00	15	
-3.03	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.86	-5.15	-6.11	-7.45	-8.02	-8.09	-8.51	-5.00	16	
-2.50	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.87	-4.00	-5.22	-6.32	-7.38	-7.41	-7.63	-4.00	17	
-1.79	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.60	-3.00	-3.35	-5.19	-6.35	-5.97	-6.74	-3.00	18	
-1.05	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.50	-3.95	-5.08	-3.81	-4.34	-2.00	19	
-0.45	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.41	-1.65	-2.85	-1.83	-2.15	-1.00	20	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21	
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.60	1.56	2.27	3.58	1.00	22	
2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.94	2.87	4.29	5.03	2.00	23	
3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	4.22	4.39	6.30	6.16	3.00	24	
4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.43	5.88	5.77	7.75	7.15	4.00	25	
5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.31	6.97	6.65	8.39	7.93	5.00	26	
6.00	6.02	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	7.57	7.64	8.85	8.53	6.00	27	
7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	8.25	7.00	7.00	7.00	7.00	6.83	8.10	8.17	9.20	9.16	6.73	28	
8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.63	9.41	7.50	8.00	8.00	7.50	8.71	8.53	9.45	9.48	7.54	29	
9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.62	11.29	8.14	9.00	9.00	8.21	9.34	9.16	9.80	9.87	8.07	30	
10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	11.57	13.05	9.16	10.00	10.00	8.92	10.00	10.00	10.23	10.15	8.46	31	
11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	12.66	14.33	10.08	11.00	11.00	9.94	11.00	11.00	11.00	10.54	9.13	32	
12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	14.01	15.74	11.07	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	11.43	9.38	33	
13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	15.63	17.44	11.78	13.00	13.00	13.00	13.00	13.16	12.81	12.31	9.59	34	
14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	15.00	17.97	18.89	12.85	14.00	14.75	14.00	14.00	14.43	14.00	13.23	9.73	35	
14.33	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	17.15	19.84	20.26	14.79	15.28	16.38	15.14	15.00	15.35	15.00	14.71	10.12	36	
14.68	16.55	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.16	19.73	22.10	21.15	18.00	16.87	17.44	16.52	16.41	16.13	16.00	16.00	10.26	37	
15.14	17.72	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.30	24.37	24.97	22.42	18.78	18.07	18.53	17.44	17.51	17.00	17.00	16.48	10.47	38	
15.74	18.64	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.82	26.59	27.02	26.59	19.56	18.96	19.20	18.29	18.67	17.68	18.00	17.08	10.83	39	
16.31	19.28	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.63	27.65	27.90	26.98	20.23	19.77	19.70	19.24	19.56	19.00	19.00	18.46	11.32	40	
18.11	19.81	20.00	20.00	20.00	20.09	20.26	20.26	20.30	20.65	28.85	29.10	28.04	20.97	20.48	20.26	20.26	20.23	20.09	19.95	19.84	19.20	11.41	41

Tabela 7.4. Visine z_{br} [mm] tačaka deformisanih radijalnih linija

$i=22$	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	$i=1$
0.00	0.54	1.72	3.07	4.12	5.67	6.81	8.36	9.86	9.70	9.46	11.16	11.24	11.69	13.28	14.18	15.07	16.01	16.98	18.41	19.47	21.00	1
0.00	0.79	1.80	3.19	4.29	5.71	6.89	8.28	9.41	10.15	10.11	10.76	10.88	11.94	13.16	14.14	15.07	16.05	17.11	18.21	19.06	21.00	2
0.00	0.99	2.01	3.27	4.37	5.75	6.85	8.19	9.17	10.27	10.24	10.64	10.84	12.30	12.96	14.14	15.15	16.13	17.07	18.21	18.86	21.22	3
0.00	1.11	2.09	3.39	4.37	5.79	6.81	8.11	9.09	10.27	10.27	10.64	10.80	12.63	12.91	14.42	15.24	16.17	17.19	18.45	18.82	21.46	4
0.00	1.24	2.17	3.43	4.45	5.83	6.81	8.03	9.05	10.24	10.31	10.68	10.96	13.00	13.12	14.66	15.48	16.37	17.31	18.45	18.90	21.87	5
0.00	1.19	2.24	3.55	4.49	5.83	6.85	8.03	9.01	10.07	10.51	10.64	11.37	13.24	13.24	14.95	15.84	16.74	17.39	18.86	19.24	25.94	6
0.00	1.27	2.33	3.59	4.61	5.87	6.89	8.03	9.01	9.98	10.43	10.68	11.86	13.57	13.61	15.64	16.24	17.15	17.72	19.34	19.71	30.37	7
0.00	1.24	2.33	3.59	4.69	5.91	6.85	8.03	9.01	9.94	10.47	10.80	12.39	13.89	13.89	16.13	16.74	17.64	18.08	20.04	20.28	30.66	8
0.00	1.19	2.33	3.59	4.69	5.83	6.89	8.03	9.01	10.07	10.68	11.29	12.87	14.14	14.24	16.50	16.98	18.12	18.45	20.65	20.81	30.90	9
0.00	1.19	2.29	3.64	4.73	5.87	6.85	8.07	8.97	10.19	10.88	11.98	13.28	14.50	14.75	17.03	17.51	18.69	18.86	21.34	21.38	31.03	10
0.00	1.15	2.29	3.59	4.73	5.79	6.85	8.03	8.97	10.24	11.08	12.51	13.44	14.79	15.24	17.64	18.08	19.47	19.47	22.32	22.32	31.00	11
0.00	1.19	2.29	3.64	4.69	5.87	6.85	8.07	8.97	10.27	11.29	12.67	13.73	15.15	15.76	18.33	18.78	20.36	20.48	23.66	23.66	31.00	12
0.00	1.19	2.29	3.64	4.69	5.87	6.81	8.03	9.01	10.27	11.41	12.87	13.97	15.56	16.50	18.94	19.91	21.46	21.91	24.39	24.88	31.00	13
0.00	1.24	2.29	3.59	4.65	5.83	6.85	8.07	9.01	10.35	11.49	12.96	14.22	15.89	17.24	19.51	20.77	22.44	23.24	25.12	26.39	31.00	14
0.00	1.19	2.29	3.51	4.57	5.79	6.81	8.03	9.01	10.35	11.57	13.04	14.46	16.21	17.68	19.96	21.30	22.85	23.78	25.69	27.04	31.00	15
0.00	1.19	2.24	3.47	4.57	5.79	6.81	8.03	9.01	10.35	11.57	13.12	14.54	16.46	18.00	20.24	21.66	23.21	24.19	26.26	27.44	31.00	16
0.00	1.24	2.21	3.43	4.49	5.79	6.77	7.95	8.97	10.35	11.53	13.16	14.62	16.66	18.24	20.44	21.99	23.62	24.64	26.55	27.77	31.00	17
0.00	1.15	2.21	3.39	4.45	5.75	6.73	7.87	8.93	10.31	11.49	13.16	14.66	16.78	18.41	20.53	22.11	23.78	25.08	26.87	28.05	31.00	18
0.00	1.15	2.21	3.47	4.41	5.71	6.69	7.87	8.89	10.27	11.45	13.16	14.62	16.78	18.45	20.53	22.11	23.90	25.33	27.08	28.30	31.00	19
0.00	1.15	2.21	3.47	4.41	5.67	6.69	7.83	8.84	10.19	11.41	13.12	14.58	16.70	18.45	20.44	22.11	24.03	25.41	27.08	28.30	31.00	20
0.00	1.15	2.17	3.47	4.37	5.59	6.69	7.83	8.84	10.15	11.41	13.12	14.54	16.66	18.41	20.36	22.03	23.90	25.29	27.08	28.34	31.00	21
0.00	1.24	2.17	3.43	4.37	5.59	6.69	7.83	8.84	10.19	11.41	13.04	14.50	16.50	18.33	20.32	22.03	23.86	25.16	27.04	28.34	31.00	22
0.00	1.24	2.17	3.35	4.37	5.59	6.65	7.79	8.84	10.15	11.29	12.96	14.42	16.41	18.12	20.20	21.87	23.66	25.16	26.87	28.34	31.00	23
0.00	1.19	2.13	3.39	4.37	5.59	6.57	7.75	8.76	10.15	11.29	12.91	14.30	16.24	17.96	20.04	21.71	23.37	25.04	26.43	28.18	31.00	24
0.00	1.19	2.17	3.35	4.37	5.55	6.57	7.75	8.76	10.11	11.33	12.83	14.22	16.05	17.72	19.75	21.42	22.93	24.72	25.73	27.77	31.00	25
0.00	1.19	2.21	3.35	4.41	5.55	6.52	7.75	8.80	10.11	11.24	12.71	14.09	15.80	17.43	19.39	21.14	22.44	24.43	25.21	27.16	31.00	26
0.00	1.19	2.24	3.35	4.41	5.51	6.52	7.75	8.80	10.07	11.16	12.59	13.89	15.48	17.15	18.94	20.85	21.91	23.66	24.35	26.47	31.00	27
0.00	1.19	2.24	3.39	4.45	5.59	6.48	7.79	8.80	10.03	11.08	12.51	13.48	15.24	16.74	18.45	20.32	21.09	22.97	23.33	25.49	31.00	28
0.00	1.15	2.29	3.39	4.45	5.63	6.52	7.83	8.76	9.98	10.96	12.18	13.20	15.15	16.29	17.72	19.59	19.83	21.95	21.99	24.43	31.00	29
0.00	1.11	2.24	3.43	4.45	5.59	6.52	7.79	8.76	9.90	10.88	12.10	12.83	14.91	15.76	17.03	18.73	19.06	20.40	21.05	22.15	30.86	30
0.00	1.15	2.24	3.47	4.45	5.71	6.61	7.79	8.72	9.82	10.88	11.82	12.34	14.62	15.28	16.41	18.29	18.49	19.43	20.24	21.24	30.74	31
0.00	1.19	2.37	3.51	4.53	5.71	6.65	7.83	8.76	9.78	10.76	11.57	11.98	14.24	14.83	15.84	17.51	17.80	18.61	19.39	20.53	30.33	32
0.00	1.24	2.33	3.59	4.57	5.71	6.69	7.83	8.68	9.74	10.64	11.33	11.65	13.89	14.54	15.40	16.46	17.24	18.04	18.73	19.71	30.09	33
0.00	1.27	2.37	3.59	4.57	5.71	6.73	7.87	8.64	9.74	10.55	11.04	11.29	13.69	14.22	15.03	15.97	16.78	17.39	18.37	19.14	29.89	34
0.00	1.32	2.39	3.59	4.57	5.71	6.69	7.91	8.60	9.70	10.35	10.84	11.29	13.40	13.85	14.42	15.48	16.33	16.94	18.00	18.82	29.40	35
0.00	1.32	2.24	3.55	4.53	5.71	6.73	7.87	8.64	9.70	10.27	10.59	10.84	12.79	13.32	13.81	15.03	15.97	16.70	17.76	18.65	22.28	36
0.00	1.27	2.24	3.51	4.45	5.71	6.73	7.91	8.72	9.70	10.35	10.47	10.72	11.69	12.71	13.40	14.54	15.56	16.58	17.68	18.69	21.79	37
0.00	1.27	2.17	3.51	4.37	5.71	6.73	7.91	8.80	9.78	10.19	10.39	10.64	11.41	12.26	13.12	14.34	15.40	16.46	17.68	18.65	21.34	38
0.00	1.19	2.17	3.43	4.33	5.75	6.69	7.91	9.09	9.86	10.27	10.51	10.72	11.24	11.94	13.08	14.18	15.28	16.45	17.72	18.73	21.09	39
0.00	1.03	2.13	3.39	4.29	5.71	6.69	7.91	9.01	9.86	10.24	10.64	10.88	11.21	11.82	13.00	14.18	15.28	16.41	17.80	18.82	21.00	40
0.00	0.79	1.72	3.15	4.29	5.67	6.65	7.83	8.93	9.66	9.70	10.88	11.29	11.29	11.94	13.08	14.22	15.28	16.41	17.92	18.94	21.00	$i=41$

Numeričke vrijednosti tačaka deformisanih linija (Slika 7.1. i Slika 7.2. i Tabela 7.1. do Tabele 7.4.) predstavljaju dio ulaznih podataka za određivanje deformacionog stanja. Obrada podataka vrši se računarski uz pomoć programa napravljenog u MATLAB-u (v. 7.0) datog u Prilogu P.3. (Program P.3.1.). Najprije se određuju presječne tačke radijalnih i aksijalnih deformisanih linija mreže i one predstavljaju tačke presjeka čija se pomjeranja u radijalnom i aksijalnom pravcu mogu odrediti. Koordinate dobijenih presječnih tačaka date su u Tabeli 7.5. i Tabeli 7.6. Vrijednosti tačaka deformisanih linija između presječnih tačaka program određuje automatski, kao što je već napomenuto, kubnom interpolacijom. Na taj način se dobija precizno numerički definisana deformisana mreža bez produžetaka postavljenih linija izvan zone presjeka (Slika 7.1. i Slika 7.2.), što je rađeno radi lakše realizacije programa (Slika 7.3.).

Tabela 7.5. Radijusi r_{pb} [mm] presječnih tačaka deformisane mreže

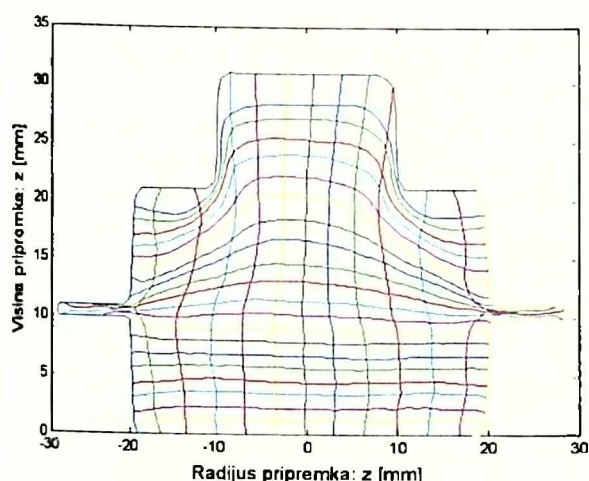
$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_z=13$
1	-18.65	-16.32	-12.45	-8.33	-5.57	-2.10	0.92	3.94	6.96	9.56	13.20	16.20	18.70
2	-19.45	-17.17	-11.92	-8.33	-5.52	-2.21	0.70	3.60	6.49	8.96	13.04	16.99	19.53
3	-19.52	-17.17	-11.80	-8.24	-5.51	-2.28	0.55	3.37	6.21	8.77	12.90	17.23	19.62
4	-19.61	-17.07	-11.69	-8.12	-5.38	-2.36	0.41	3.17	5.84	8.35	12.66	17.47	19.76
5	-19.67	-16.91	-11.71	-7.98	-5.30	-2.46	0.27	2.98	5.60	8.06	12.46	17.50	19.86
6	-19.73	-16.89	-11.98	-7.82	-5.29	-2.57	0.08	2.68	5.36	7.96	12.39	17.40	19.95
7	-19.79	-17.00	-12.20	-7.87	-5.26	-2.54	0.02	2.55	5.28	8.07	12.53	17.36	20.06
8	-19.85	-17.18	-12.41	-8.21	-5.22	-2.53	-0.02	2.49	5.28	8.35	12.60	17.73	20.18
9	-20.02	-17.56	-12.68	-8.55	-5.38	-2.63	-0.09	2.46	5.28	8.59	12.70	18.42	20.55
10	-25.08	-18.58	-13.15	-8.95	-5.73	-2.81	-0.19	2.45	5.32	8.87	12.82	19.58	27.29
11	-28.27	-19.12	-13.60	-9.46	-6.17	-3.07	-0.32	2.45	5.43	9.10	12.98	22.35	28.45
12	-28.51	-19.37	-14.16	-10.17	-6.68	-3.33	-0.42	2.50	5.58	9.27	13.27	19.33	28.14
13	-23.24	-19.09	-14.47	-10.43	-7.01	-3.46	-0.42	2.59	5.81	9.55	13.52	18.61	20.28
14	-20.12	-18.33	-14.58	-10.52	-7.11	-3.46	-0.29	2.91	6.26	9.99	13.76	17.93	20.02
15	-19.91	-18.04	-14.51	-10.55	-7.13	-3.49	-0.27	3.01	6.50	10.15	13.83	17.63	19.99
16	-19.84	-17.79	-14.33	-10.63	-7.06	-3.56	-0.30	2.98	6.61	10.21	13.80	17.54	19.94
17	-19.79	-17.59	-14.13	-10.56	-6.97	-3.56	-0.24	3.06	6.69	10.28	13.83	17.51	19.87
18	-19.72	-17.30	-13.87	-10.29	-6.83	-3.43	-0.11	3.19	6.79	10.35	14.00	17.57	19.78
19	-19.67	-17.18	-13.67	-10.07	-6.81	-3.36	-0.12	3.16	6.81	10.33	13.98	17.46	19.71
20	-19.60	-17.23	-13.60	-10.09	-6.87	-3.40	-0.15	3.09	6.66	9.98	13.56	17.14	19.61
21	-19.43	-16.86	-13.55	-10.10	-6.82	-3.40	-0.18	3.04	6.47	9.86	13.38	16.91	19.55
$i_t=22$	-18.23	-16.54	-13.50	-9.96	-6.74	-3.35	-0.21	2.94	6.30	9.84	13.27	16.73	18.11

Tabela 7.6. Visine z_{pb} [mm] presječnih tačaka deformisane mreže

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_z=13$
1	21.00	21.00	21.00	31.01	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	29.92	21.00	21.00	21.00
2	19.41	19.03	19.68	27.51	28.18	28.30	28.34	28.34	28.04	25.80	18.89	18.72	18.91
3	18.38	18.25	19.23	26.08	26.91	27.08	27.07	26.95	26.45	24.50	18.34	17.69	17.88
4	17.01	17.07	18.74	24.09	25.27	25.39	25.26	25.14	24.70	22.45	17.67	16.46	16.41
5	16.02	16.19	17.91	22.87	23.76	23.98	23.89	23.65	23.01	21.15	17.03	15.40	15.28
6	15.07	15.19	16.99	20.07	21.96	22.11	22.03	21.76	21.12	19.03	16.27	14.35	14.21
7	14.17	14.42	16.00	18.77	20.21	20.53	20.36	20.11	19.26	17.67	15.20	13.43	13.05
8	13.24	13.25	14.91	16.71	18.16	18.44	18.41	18.04	17.35	16.10	14.35	12.39	11.89
9	11.72	12.44	13.97	15.33	16.37	16.78	16.66	16.33	15.71	14.78	13.44	11.54	11.24

Tabela 7.6. Visine z_{pb} [mm] presječnih tačaka deformisane mreže (nastavak)

i ↓ j →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	jz=13
10	11.00	11.37	12.84	13.74	14.48	14.65	14.55	14.37	14.03	13.33	12.40	10.92	11.00
11	11.00	10.82	11.92	12.60	13.03	13.16	13.12	12.94	12.66	12.14	11.51	10.46	10.75
12	10.00	10.46	10.86	11.20	11.52	11.50	11.41	11.29	11.19	10.88	10.52	10.34	10.02
13	10.00	10.19	9.95	10.22	10.35	10.33	10.17	10.15	10.08	9.86	9.72	9.86	9.72
14	9.75	9.25	9.03	8.97	9.01	8.95	8.84	8.77	8.80	8.72	8.61	8.92	8.96
15	8.34	8.19	8.03	8.05	8.06	7.91	7.83	7.75	7.77	7.80	7.90	7.91	7.85
16	6.82	6.84	6.88	6.85	6.85	6.75	6.69	6.57	6.50	6.62	6.70	6.71	6.66
17	5.68	5.77	5.86	5.83	5.83	5.77	5.61	5.59	5.57	5.71	5.71	5.73	5.68
18	4.17	4.37	4.62	4.73	4.64	4.47	4.37	4.37	4.44	4.48	4.57	4.35	4.29
19	3.11	3.37	3.59	3.59	3.57	3.40	3.47	3.38	3.38	3.48	3.59	3.47	3.22
20	1.74	2.07	2.33	2.29	2.29	2.21	2.18	2.13	2.24	2.24	2.32	2.17	1.88
21	0.68	1.13	1.26	1.15	1.23	1.19	1.15	1.19	1.19	1.14	1.29	1.27	0.91
i _z =22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Slika 7.3. Programski generisana deformisana mreža

Nedeformisana mreža se generiše na osnovu poznatih vrijednosti geometrijskih parametara žljebastih ploča od kojih su napravljeni pripremci (Slika 4.10.). Ove dimenzije se razlikuju u zavisnosti od serije izrade ploča. Rađene su tri serije ploča sa tri različita prečnika. U cilju postizanja što veće tačnosti proračuna određene su sve vrijednosti geometrijskih parametara žljebastih ploča za svaku seriju. Parametri žljebastih pločica su određeni tako što su izrađeni pripremci za sve tri vrijednosti prečnika (Slika 4.19.) obrađeni na identičan način kao i obradci (Tačka 4.7.2.) i nanosena mreža, čijom se računskom analizom dolazi do vrijednosti radijusa i visine čvornih tačaka nedeformisane mreže, odnosno do

mjerodavnih geometrijskih parametara žljebastih pločica (Slika 4.10.). Dobijene vrijednosti su date u Tabeli 7.7. U navedenoj tabeli je dat i parametar p_0 koji predstavlja debljinu ravnog dijela početne ploče (Slika 5.12.-a). Parametar p_{10} se određuje na osnovu neophodne visine pripremljaka i broja ploča potrebnih za izradu pripremljaka (Slika 4.12.-b).

Kako je nedeformisana mreža pravougaona, pri čemu su radijalne i aksijalne linije prave linije, upravne odnosno paralelne osi pripremljaka, za generisanje mreže dovoljno je odrediti presječne - čvorne tačke mreže. U Tabeli 7.8. i Tabeli 7.9. su date vrijednosti koordinata presječnih tačaka nedeformisane mreže, a na Slici 7.4. njen programski generisan izgled u centralnoj tački plana eksperimenta.

Tabela 7.7. Geometrijski parametri žljebastih ploča

Seriya	d_0 [mm]	p_0 [mm]	p_1 [mm]	p_2 [mm]	p_3 [mm]	p_4 [mm]	p_5 [mm]	p_6 [mm]	p_7 [mm]	p_8 [mm]	p_9 [mm]
1	30.28	3.02	2.94	2.98	2.95	2.99	3.29	-	1.44	1.61	1.44
2	33.56	1.49	2.81	2.96	2.96	2.97	3.04	2.00	1.45	1.66	1.45
3	36.30	1.47	2.90	2.98	2.93	2.99	3.02	3.26	1.46	1.69	1.46

Tabela 7.8. Radijusi r_{p0} [mm] presječnih tačaka nedeformisane mreže

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_z=13$
1	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
2	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
3	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
4	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
5	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
6	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
7	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
8	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
9	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
10	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
11	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
12	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
13	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
14	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
15	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
16	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
17	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
18	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
19	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
20	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
21	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75
$i_r=22$	-16.75	-14.71	-11.65	-8.71	-5.75	-2.80	0.00	2.81	5.79	8.75	11.76	14.78	16.75

Na osnovu poznatih vrijednosti koordinata presječnih tačaka radijalnih i aksijalnih linija nedeformisane i deformisane mreže (Slika 7.4. i Slika 7.3.) određuju se pomjeranja tačaka u radijalnom i aksijalnom pravcu. Pri tome, pomjeranja su:

$$\left. \begin{aligned} u_{rb} &= r_{pb} - r_{p0} \\ u_{zb} &= z_{pb} - z_{p0} \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

Vrijednosti pomjeranja u ostalim tačkama se aproksimiraju kubnom interpolacijom, tako da se praktično dobija neprekidna funkcija pomjeranja u meridijalnoj ravni obradka u zavisnosti od koordinata radijusa i visine. Na taj način moguće je odrediti parcijalne izvode pomjeranja po radijusu i visini, preko kojih se dolazi do relativnih deformacija. Vrijednosti parcijalnih izvoda pomjeranja po radijusu i visini dati su u Tabli 7.10. do Tabele 7.13.

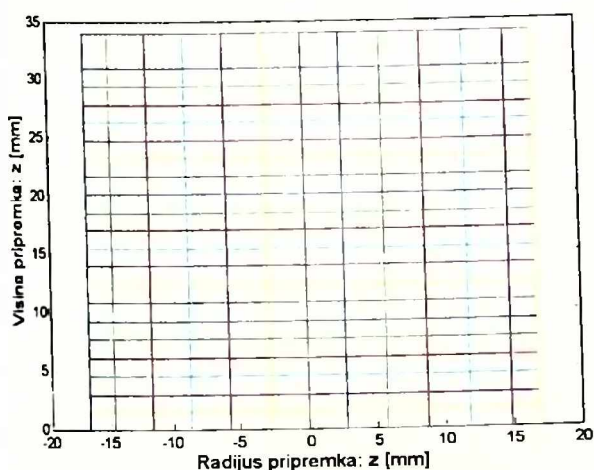
Tabela 7.9. Visine z_{p0} [mm] presječnih tačaka nedeformisane mreže

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_z=13$
1	33.94	33.94	33.94	33.94	33.94	33.94	33.94	33.94	33.94	33.94	33.94	33.94	33.94
2	30.92	30.92	30.92	30.92	30.92	30.92	30.92	30.92	30.92	30.92	30.92	30.92	30.92
3	29.47	29.47	29.47	29.47	29.47	29.47	29.47	29.47	29.47	29.47	29.47	29.47	29.47
4	27.81	27.81	27.81	27.81	27.81	27.81	27.81	27.81	27.81	27.81	27.81	27.81	27.81
5	26.36	26.36	26.36	26.36	26.36	26.36	26.36	26.36	26.36	26.36	26.36	26.36	26.36
6	24.70	24.70	24.70	24.70	24.70	24.70	24.70	24.70	24.70	24.70	24.70	24.70	24.70
7	23.25	23.25	23.25	23.25	23.25	23.25	23.25	23.25	23.25	23.25	23.25	23.25	23.25
8	21.59	21.59	21.59	21.59	21.59	21.59	21.59	21.59	21.59	21.59	21.59	21.59	21.59
9	20.14	20.14	20.14	20.14	20.14	20.14	20.14	20.14	20.14	20.14	20.14	20.14	20.14
10	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49	18.49
11	17.04	17.04	17.04	17.04	17.04	17.04	17.04	17.04	17.04	17.04	17.04	17.04	17.04
12	15.38	15.38	15.38	15.38	15.38	15.38	15.38	15.38	15.38	15.38	15.38	15.38	15.38
13	13.93	13.93	13.93	13.93	13.93	13.93	13.93	13.93	13.93	13.93	13.93	13.93	13.93
14	12.27	12.27	12.27	12.27	12.27	12.27	12.27	12.27	12.27	12.27	12.27	12.27	12.27

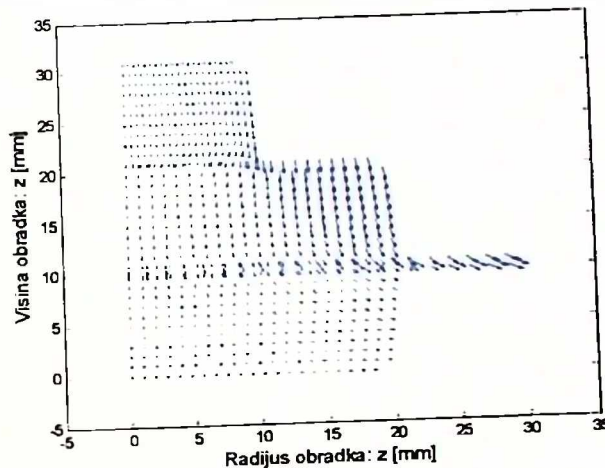
7. Zapreminsko deformisanje u otvorenim kalupima

Tabela 7.9. Visine z_{p0} [mm] presječnih tačaka nedeformisane mreže (nastavak)

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_z=13$
15	10.82	10.82	10.82	10.82	10.82	10.82	10.82	10.82	10.82	10.82	10.82	10.82	10.82
16	9.16	9.16	9.16	9.16	9.16	9.16	9.16	9.16	9.16	9.16	9.16	9.16	9.16
17	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71	7.71
18	6.05	6.05	6.05	6.05	6.05	6.05	6.05	6.05	6.05	6.05	6.05	6.05	6.05
19	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60
20	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94
21	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
$i_z=22$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Slika 7.4. Programski generisana nedeformisana mreža



Slika 7.5. Pomjeranja presječnih tačaka deformisane mreže

Tabela 7.10. Parcijalni izvod radijalnog pomjeranja po radijusu $\partial u_r / \partial r$

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_z=13$
1	0.0895	0.1830	0.3417	0.0265	0.0073	0.1153	0.0750	0.0293	-0.0128	0.0103	0.0190	0.0248	0.3834
2	-0.0002	0.2479	0.3724	0.0072	0.0054	0.0622	0.0332	0.0007	-0.0627	0.0114	0.3401	0.2972	0.2848
3	-0.0002	0.2964	0.3652	0.0029	0.0007	0.0271	0.0031	-0.0021	-0.0769	0.0150	0.4198	0.2920	0.1371
4	0.0416	0.4050	0.3648	0.0038	-0.0056	0.0017	-0.0160	-0.0343	-0.1308	0.0180	0.5344	0.2682	-0.0003
5	0.2117	0.4847	0.4107	0.0077	-0.0567	-0.0290	-0.0296	-0.0591	-0.1499	0.0189	0.5835	0.3230	0.0157
6	0.3112	0.4820	0.5135	0.0169	-0.1074	-0.0625	-0.0639	-0.0876	-0.1134	0.0242	0.5842	0.4198	0.1629
7	0.2855	0.4488	0.5432	0.0255	-0.0992	-0.0811	-0.0928	-0.0913	-0.0704	0.0318	0.5605	0.4589	0.2827
8	0.2059	0.4018	0.5086	0.0471	-0.0045	-0.0973	-0.1092	-0.0816	-0.0017	0.0939	0.5487	0.3752	0.0650
9	0.0462	0.3212	0.5010	0.1388	-0.0010	-0.0804	-0.0965	-0.0698	0.0034	0.1894	0.5677	0.1940	-0.0001
10	2.7434	1.2369	0.5541	0.1598	0.0043	-0.0157	-0.0664	-0.0476	0.0112	0.2473	0.5206	1.8698	3.5810
11	4.5377	1.4973	0.5412	0.1848	0.0705	0.0015	-0.0186	-0.0008	0.0190	0.2633	0.6136	2.1463	2.1102
12	4.5655	1.3709	0.4687	0.2370	0.1560	0.0613	0.0353	0.0352	0.0742	0.2835	0.4995	1.7584	4.4442
13	1.2406	0.7114	0.4345	0.2210	0.1758	0.1222	0.0739	0.0744	0.1330	0.2900	0.4688	0.0507	-0.4602
14	-0.2575	0.0094	0.3032	0.2274	0.1867	0.1714	0.1330	0.1311	0.1728	0.2568	0.3153	0.1190	-0.0001
15	-0.1791	0.0056	0.2323	0.2234	0.1876	0.1851	0.1547	0.1672	0.2001	0.2284	0.2385	0.2256	0.1780
16	0.0000	0.0203	0.1826	0.2330	0.1948	0.1754	0.1635	0.1887	0.2206	0.2033	0.2108	0.2288	0.2173
17	0.0542	0.0958	0.1676	0.2160	0.1805	0.1709	0.1781	0.1935	0.2172	0.1932	0.1963	0.2096	0.1950
18	0.2092	0.1479	0.1590	0.1926	0.1595	0.1678	0.1784	0.1909	0.2065	0.2074	0.1955	0.1469	0.1062
19	0.2437	0.1779	0.1830	0.1434	0.1269	0.1648	0.1586	0.1923	0.2069	0.2014	0.1770	0.1448	0.1403
20	0.1520	0.1738	0.1952	0.1204	0.1165	0.1696	0.1541	0.1744	0.1536	0.1504	0.1848	0.2165	0.2921
21	0.3298	0.1356	0.1155	0.1349	0.1275	0.1565	0.1457	0.1485	0.1498	0.1559	0.1657	0.2344	0.4107
$i_z=22$	-0.2369	-0.0245	0.0192	0.1321	0.1101	0.1362	0.1187	0.1224	0.1587	0.1649	0.1454	-0.0143	-0.4698

Tabela 7.11. Parcijalni izvod radialnog pomjeranja po visini $\partial u_r / \partial z$

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_z=13$
1	0.4173	0.4710	-0.2295	0.0000	-0.0246	0.0224	0.0543	0.0817	0.1337	0.2418	0.0290	-0.3297	-0.4148
2	0.0770	0.0148	-0.1119	-0.0080	-0.0088	0.0454	0.0890	0.1382	0.1751	0.1494	0.0722	-0.1925	-0.1001
3	0.0476	-0.0077	-0.0777	-0.0689	-0.0213	0.0487	0.0937	0.1383	0.2082	0.1765	0.1177	-0.1606	-0.0697
4	0.0483	-0.0908	-0.0063	-0.0809	-0.0719	0.0550	0.0879	0.1213	0.1956	0.2361	0.1520	-0.0452	-0.0760
5	0.0397	-0.0373	0.0415	-0.1043	-0.0147	0.0735	0.1059	0.1569	0.1591	0.1051	0.0712	0.0079	-0.0636
6	0.0382	0.0100	0.1621	-0.0076	-0.0107	0.0044	0.0685	0.1218	0.0837	-0.0034	-0.0141	0.0384	-0.0648
7	0.0370	0.0938	0.1383	0.0693	-0.0240	-0.0148	0.0291	0.0554	0.0055	-0.1113	-0.0665	-0.0163	-0.0701
8	0.0551	0.1595	0.1512	0.2257	0.0092	0.0072	0.0307	0.0260	0.0000	-0.1717	-0.0508	-0.3259	-0.1130
9	0.4679	0.3878	0.2250	0.2364	0.1491	0.0888	0.0547	0.0108	-0.0012	-0.1667	-0.0698	-0.5603	-0.8623
10	2.8055	0.4889	0.3004	0.2881	0.2559	0.1424	0.0750	0.0005	-0.0378	-0.1632	-0.0888	-1.1922	-1.7632
11	0.5424	0.2368	0.3273	0.3955	0.3100	0.1722	0.0780	-0.0021	-0.0857	-0.1238	-0.1364	-0.0662	-0.0746
12	-0.3912	-0.0057	0.2755	0.2716	0.2737	0.1216	0.0137	-0.0399	-0.1168	-0.1367	-0.1765	0.9787	1.0741
13	-2.9648	-0.3114	0.1149	0.0956	0.1096	0.0124	-0.0126	-0.1108	-0.2106	-0.2358	-0.1622	0.4404	1.4322
14	-0.4374	-0.3012	0.0002	0.0295	0.0257	0.0018	-0.0412	-0.1196	-0.2153	-0.1720	-0.0804	0.2870	0.0343
15	-0.0676	-0.1693	-0.0726	0.0320	-0.0037	0.0325	0.0018	-0.0038	-0.1008	-0.0597	-0.0023	0.0993	0.0207
16	-0.0379	-0.1411	-0.1247	0.0016	-0.0529	0.0068	-0.0019	-0.0046	-0.0603	-0.0392	0.0011	0.0292	0.0383
17	-0.0400	-0.1559	-0.1493	-0.0880	-0.0758	-0.0169	-0.0617	-0.0743	-0.0608	-0.0453	-0.0450	-0.0040	0.0521
18	-0.0382	-0.1191	-0.1524	-0.1738	-0.0306	-0.0680	-0.0082	-0.0069	-0.0237	-0.0036	-0.0136	0.0028	0.0538
19	-0.0353	-0.0030	-0.0734	-0.0142	0.0046	-0.0016	0.0071	0.0286	0.0084	0.0484	0.0507	0.1157	0.0529
20	-0.0587	-0.0321	-0.0348	0.0099	0.0017	0.0085	0.0197	0.0401	0.1141	0.1341	0.1835	0.1782	0.0475
21	-0.2378	-0.2507	-0.0319	-0.0057	-0.0438	-0.0023	0.0174	0.0484	0.1223	0.0274	0.0942	0.1368	0.1442
$i_r=22$	-1.1504	-0.1995	-0.0375	-0.1446	-0.0653	-0.0551	0.0188	0.0773	0.1102	0.0000	0.0446	0.1022	1.4157

Tabela 7.12. Parcijalni izvod aksijalnog pomjeranja po visini $\partial u_z / \partial z$

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_z=13$
1	-0.6000	-0.2733	-0.4773	0.2766	-0.0227	-0.0711	-0.1165	-0.1737	-0.0645	0.6794	-0.0820	-0.2142	-0.3246
2	-0.3501	-0.4159	-0.6333	0.0048	-0.1021	-0.1433	-0.1297	-0.0591	0.0146	-0.0074	-0.4496	-0.2715	-0.3029
3	-0.2140	-0.3644	-0.7135	0.0376	-0.0325	-0.0174	0.0009	0.0114	0.0790	0.0248	-0.6232	-0.2754	-0.1723
4	-0.2267	-0.3323	-0.5352	0.0017	0.0046	-0.0033	0.0044	0.0483	0.0946	0.0219	-0.5751	-0.2598	-0.1505
5	-0.3726	-0.3960	-0.4360	0.0933	0.0560	0.0112	0.0028	0.0511	0.1523	0.0300	-0.5593	-0.3114	-0.2837
6	-0.4023	-0.4411	-0.3687	0.0814	0.1324	0.1101	0.1432	0.1407	0.1987	0.0327	-0.3558	-0.3679	-0.2607
7	-0.4260	-0.3669	-0.3261	0.0182	0.2281	0.1436	0.1629	0.1814	0.2085	-0.0595	-0.3439	-0.3670	-0.2347
8	-0.0312	-0.3604	-0.3505	0.0251	0.2407	0.1895	0.1884	0.2112	0.1458	-0.0669	-0.4284	-0.3884	-0.3986
9	-0.0344	-0.3981	-0.3315	-0.0458	0.1847	0.1997	0.2474	0.1884	0.0401	-0.1038	-0.3713	-0.4999	-0.6834
10	-0.7877	-0.4574	-0.3418	-0.0818	0.0186	0.0803	0.0280	0.0173	-0.0041	-0.1496	-0.3797	-0.6571	-0.8569
11	-0.6261	-0.7007	-0.3671	-0.1883	-0.0069	0.0029	0.0019	-0.0106	-0.0789	-0.2067	-0.3929	-0.7966	-0.6734
12	-0.5974	-0.8123	-0.3639	-0.2199	-0.1318	-0.0209	-0.0092	-0.0337	-0.1625	-0.2661	-0.4276	-0.7962	-0.6645
13	-1.0246	-0.5984	-0.4119	-0.2898	-0.1958	-0.1900	-0.1757	-0.2006	-0.2337	-0.3047	-0.3814	-0.5361	-0.6833
14	-0.1517	-0.3319	-0.3688	-0.3012	-0.2589	-0.2151	-0.2473	-0.2193	-0.2599	-0.3418	-0.4166	-0.3526	-0.3283
15	-0.0398	-0.2173	-0.3032	-0.3216	-0.3099	-0.2967	-0.3149	-0.2985	-0.2580	-0.3236	-0.3755	-0.2833	-0.2468
16	-0.1415	-0.2207	-0.3053	-0.2835	-0.2799	-0.3190	-0.2805	-0.3073	-0.2875	-0.3325	-0.2902	-0.3069	-0.3131
17	-0.1344	-0.1995	-0.2735	-0.3209	-0.2904	-0.2603	-0.2500	-0.2918	-0.3455	-0.3093	-0.3166	-0.2252	-0.2234
18	-0.1528	-0.2208	-0.2698	-0.2643	-0.2752	-0.2359	-0.3177	-0.2937	-0.2905	-0.2844	-0.3220	-0.2577	-0.2063
19	-0.2214	-0.2593	-0.2643	-0.2130	-0.2444	-0.2742	-0.2858	-0.2796	-0.2882	-0.2820	-0.2757	-0.2913	-0.2234
20	-0.2091	-0.2765	-0.2530	-0.2148	-0.2496	-0.2909	-0.2530	-0.2976	-0.2952	-0.2463	-0.2653	-0.2902	-0.2462
21	-0.3627	-0.2998	-0.2038	-0.2213	-0.2197	-0.2472	-0.2627	-0.2701	-0.2367	-0.2390	-0.1982	-0.2412	-0.3621
$i_r=22$	-0.6837	-0.1911	-0.1078	-0.2333	-0.1284	-0.1613	-0.1988	-0.1295	-0.1668	-0.2289	-0.0619	-0.0334	-0.4225

Tabela 7.13. Parcijalni izvod aksijalnog pomjeranja po radijusu $\partial u_r / \partial r$

$i \rightarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j=13$
1	0.0000	0.0000	0.3972	0.3759	-0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0172	-0.9313	-0.2528	0.0000	0.0000
2	-0.3460	-0.0031	0.6525	0.6619	0.0739	0.0216	0.0008	-0.0041	-0.2038	-1.3053	-0.2787	0.0061	0.1595
3	-0.1977	0.0158	0.7678	0.6989	0.0993	0.0025	-0.0083	-0.0716	-0.2803	-1.1300	-0.5235	-0.0054	0.2194
4	0.0000	0.0807	0.9591	0.7745	0.0880	-0.0014	-0.0459	-0.0662	-0.2718	-1.1046	-0.7158	-0.0591	0.0000
5	-0.0001	0.1551	0.9523	0.6246	0.1253	0.0017	-0.0491	-0.1245	-0.3320	-0.9164	-0.8262	-0.1238	0.0001
6	-0.0001	0.1335	0.7942	0.8366	0.1280	0.0004	-0.0466	-0.1327	-0.3497	-0.8238	-0.7797	-0.1493	0.0001
7	-0.0002	0.2081	0.7020	0.6754	0.1958	0.0012	-0.0729	-0.1383	-0.3798	-0.6657	-0.7029	-0.2958	-0.0370
8	0.0000	0.0492	0.5948	0.5616	0.1824	0.0040	-0.0247	-0.1704	-0.3036	-0.4953	-0.6285	-0.3714	-0.0972
9	0.2996	0.4159	0.4855	0.4049	0.2109	0.0052	-0.0648	-0.1524	-0.2527	-0.3693	-0.5415	-0.2592	0.0003
10	0.0654	0.2767	0.3834	0.2797	0.1050	0.0004	-0.0491	-0.0824	-0.1568	-0.2682	-0.4014	-0.0329	0.1232
11	-0.2598	0.0311	0.2919	0.1804	0.0737	0.0015	-0.0261	-0.0772	-0.1239	-0.1903	-0.2773	-0.0211	0.3407
12	0.2612	0.1706	0.1211	0.1143	0.0082	-0.0087	-0.0391	-0.0366	-0.0522	-0.1163	-0.0812	-0.0948	-0.2016
13	0.1596	-0.0022	0.0000	0.0655	0.0026	-0.0158	-0.0158	-0.0098	-0.0399	-0.0600	0.0024	-0.0005	-0.1180
14	-0.3146	-0.1219	-0.0338	0.0003	0.0002	-0.0282	-0.0331	-0.0004	-0.0006	-0.0339	0.0076	0.0417	0.0000
15	-0.0777	-0.0641	-0.0023	0.0060	-0.0034	-0.0389	-0.0291	-0.0012	0.0077	0.0167	0.0069	-0.0029	-0.0453
16	0.0083	0.0107	-0.0001	-0.0023	-0.0035	-0.0272	-0.0299	-0.0330	0.0017	0.0345	0.0072	-0.0021	-0.0353
17	0.0474	0.0387	0.0009	-0.0040	-0.0040	-0.0315	-0.0177	-0.0075	0.0049	0.0045	0.0008	-0.0016	-0.0397
18	0.1057	0.0915	0.0528	0.0003	-0.0428	-0.0440	-0.0050	0.0018	0.0169	0.0190	-0.0042	-0.0446	-0.0117
19	0.1478	0.0974	0.0054	-0.0002	-0.0157	-0.0029	-0.0009	-0.0029	0.0025	0.0379	0.0006	-0.0674	-0.1635
20	0.1874	0.1181	0.0029	-0.0015	-0.0018	-0.0179	-0.0139	0.0023	0.0025	0.0032	0.0003	-0.0848	-0.1863
21	0.2881	0.0841	-0.0020	-0.0011	0.0018	-0.0149	0.0007	0.0010	-0.0017	0.0038	0.0044	-0.0289	-0.2532
$i=22$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

U cilju što boljeg sagledavanja promjene deformacija u meridijalnoj ravni obradka pokazalo se praktičnim da se na univerzalan način odrede tačke u kojima će se određivati naponsko deformacioni parametri i koje će važiti za sve tačke eksperimentalnog plana (Tabela 4.1.). Tako se meridijalni presjek obradka presijeca linijama paralelnim apscisi. Svaka linija se dijeli na 20 djelova tako da od ose obradka, tj. od $r=0$ [mm] do maksimalne vrijednosti radijusa koja odgovara konturi obradka ima $j=21$ tačka. Po visini obradka podjela je napravljena u zavisnosti od visine pojedinih nivoa obradka (Slika 4.1.). Osnovni, prvi i drugi nivo podijeljeni su na po 10 djelova, dok je nivo vijenca podijeljen na tri dijela. Tako je napravljena podjela po visini obradka od ukupno $i=36$ tačaka, s tim što se na granicama pojedinih nivoa visine tačaka poklapaju a radijusi se određuju za oba susjedna nivoa. Vrijednosti koordinata ovako definisanih tačaka se određuju programski, za poznatu geometriju i položaj kalupa, a dati su u Tabeli 7.14. i Tabeli 7.15. Programski generisan raspored tačaka presjeka obradka dat je na Slici 7.6.

Tabela 7.14. Radijusi tačaka presjeka r [mm]

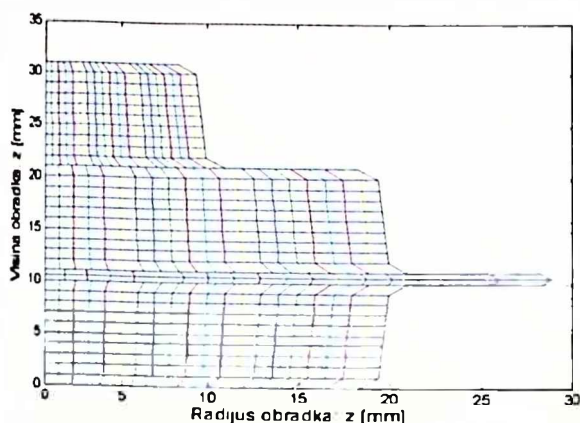
$i \rightarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.00	0.42	0.83	1.25	1.66	2.08	2.49	2.91	3.32	3.74	4.15	4.57	4.98	5.40	5.81	6.23	6.64	7.06	7.47	7.89	8.30
2	0.00	0.47	0.94	1.41	1.87	2.34	2.81	3.28	3.75	4.22	4.69	5.15	5.62	6.09	6.56	7.03	7.50	7.97	8.43	8.90	9.37
3	0.00	0.47	0.94	1.42	1.89	2.36	2.83	3.30	3.78	4.25	4.72	5.19	5.66	6.14	6.61	7.08	7.55	8.02	8.50	8.97	9.44
4	0.00	0.48	0.95	1.43	1.90	2.38	2.85	3.33	3.80	4.28	4.76	5.23	5.71	6.18	6.66	7.13	7.61	8.08	8.56	9.03	9.51
5	0.00	0.48	0.96	1.44	1.92	2.40	2.87	3.35	3.83	4.31	4.79	5.27	5.75	6.23	6.71	7.19	7.66	8.14	8.62	9.10	9.58
6	0.00	0.48	0.97	1.45	1.93	2.41	2.90	3.38	3.86	4.34	4.83	5.31	5.79	6.27	6.76	7.24	7.72	8.20	8.69	9.17	9.65
7	0.00	0.49	0.97	1.46	1.94	2.43	2.92	3.40	3.89	4.37	4.86	5.35	5.83	6.32	6.80	7.29	7.78	8.26	8.75	9.23	9.72
8	0.00	0.49	0.98	1.47	1.96	2.45	2.94	3.43	3.92	4.41	4.90	5.38	5.87	6.36	6.85	7.34	7.83	8.32	8.81	9.30	9.79
9	0.00	0.49	0.99	1.48	1.97	2.47	2.96	3.45	3.94	4.44	4.93	5.42	5.92	6.41	6.90	7.40	7.89	8.38	8.87	9.37	9.86
10	0.00	0.50	0.99	1.49	1.99	2.48	2.98	3.48	3.97	4.47	4.97	5.46	5.96	6.45	6.95	7.45	7.94	8.44	8.94	9.43	9.93
11	0.00	0.55	1.10	1.65	2.20	2.75	3.30	3.85	4.40	4.95	5.50	6.05	6.60	7.15	7.70	8.25	8.80	9.35	9.90	10.45	11.00
12	0.00	0.92	1.83	2.75	3.66	4.58	5.49	6.41	7.32	8.24	9.15	10.07	10.98	11.90	12.81	13.73	14.64	15.56	16.47	17.39	18.30
13	0.00	0.97	1.94	2.91	3.87	4.84	5.81	6.78	7.75	8.72	9.69	10.65	11.62	12.59	13.56	14.53	15.50	16.47	17.43	18.40	19.37
14	0.00	0.97	1.94	2.92	3.89	4.86	5.83	6.80	7.78	8.75	9.72	10.69	11.66	12.64	13.61	14.58	15.55	16.52	17.50	18.47	19.44
15	0.00	0.98	1.95	2.93	3.90	4.88	5.85	6.83	7.80	8.78	9.76	10.73	11.71	12.68	13.66	14.63	15.61	16.58	17.56	18.53	19.51
16	0.00	0.98	1.96	2.94	3.92	4.90	5.87	6.85	7.83	8.81	9.79	10.77	11.75	12.73	13.71	14.69	15.66	16.64	17.62	18.60	19.58
17	0.00	0.98	1.97	2.95	3.93	4.91	5.90	6.88	7.86	8.84	9.83	10.81	11.79	12.77	13.76	14.74	15.72	16.70	17.69	18.67	19.65
18	0.00	0.99	1.97	2.96	3.94	4.93	5.92	6.90	7.89	8.87	9.86	10.85	11.83	12.82	13.80	14.79	15.78	16.76	17.75	18.73	19.72

Tabela 7.14. Radijusi tačaka presjeka r [mm] (nastavak)

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
19	0.00	0.99	1.98	2.97	3.96	4.95	5.94	6.93	7.92	8.91	9.90	10.88	11.87	12.86	13.85	14.84	15.83	16.82	17.81	18.80	19.79
20	0.00	0.99	1.99	2.98	3.97	4.97	5.96	6.95	7.94	8.94	9.93	10.92	11.92	12.91	13.90	14.90	15.89	16.88	17.87	18.87	19.86
21	0.00	1.00	1.99	2.99	3.99	4.98	5.98	6.98	7.97	8.97	9.97	10.96	11.96	12.95	13.95	14.95	15.94	16.94	17.94	18.93	19.93
22	0.00	1.05	2.10	3.15	4.20	5.25	6.30	7.35	8.40	9.45	10.50	11.55	12.60	13.65	14.70	15.75	16.80	17.85	18.90	19.95	21.00
23	0.00	1.42	2.83	4.25	5.66	7.08	8.49	9.91	11.33	12.74	14.16	15.57	16.99	18.40	19.82	21.24	22.65	24.07	25.48	26.90	28.32
24	0.00	1.44	2.88	4.32	5.77	7.21	8.65	10.09	11.53	12.97	14.42	15.86	17.30	18.74	20.18	21.62	23.07	24.51	25.95	27.39	28.83
25	0.00	1.42	2.85	4.27	5.70	7.12	8.54	9.97	11.39	12.81	14.24	15.66	17.09	18.51	19.93	21.36	22.78	24.20	25.63	27.05	28.48
26	0.00	1.05	2.10	3.15	4.20	5.25	6.30	7.35	8.40	9.45	10.50	11.55	12.60	13.65	14.70	15.75	16.80	17.85	18.90	19.95	21.00
27	0.00	1.00	1.99	2.99	3.99	4.98	5.98	6.98	7.97	8.97	9.97	10.96	11.96	12.95	13.95	14.95	15.94	16.94	17.94	18.93	19.93
28	0.00	0.99	1.99	2.98	3.97	4.97	5.96	6.95	7.94	8.94	9.93	10.92	11.92	12.91	13.90	14.90	15.89	16.88	17.87	18.87	19.86
29	0.00	0.99	1.98	2.97	3.96	4.95	5.94	6.93	7.92	8.91	9.90	10.88	11.87	12.86	13.85	14.84	15.83	16.82	17.81	18.80	19.79
30	0.00	0.99	1.97	2.96	3.94	4.93	5.92	6.90	7.89	8.87	9.86	10.85	11.83	12.82	13.80	14.79	15.78	16.76	17.75	18.73	19.72
31	0.00	0.98	1.97	2.95	3.93	4.91	5.90	6.88	7.86	8.84	9.83	10.81	11.79	12.77	13.76	14.74	15.72	16.70	17.69	18.67	19.65
32	0.00	0.98	1.96	2.94	3.92	4.90	5.87	6.85	7.83	8.81	9.79	10.77	11.75	12.73	13.71	14.69	15.66	16.64	17.62	18.60	19.58
33	0.00	0.98	1.95	2.93	3.90	4.88	5.85	6.83	7.80	8.78	9.76	10.73	11.71	12.68	13.66	14.63	15.61	16.58	17.56	18.53	19.51
34	0.00	0.97	1.94	2.92	3.89	4.86	5.83	6.80	7.78	8.75	9.72	10.69	11.66	12.64	13.61	14.58	15.55	16.52	17.50	18.47	19.44
35	0.00	0.97	1.94	2.91	3.87	4.84	5.81	6.78	7.75	8.72	9.69	10.65	11.62	12.59	13.56	14.53	15.50	16.47	17.43	18.40	19.37
36	0.00	0.92	1.83	2.75	3.66	4.58	5.49	6.41	7.32	8.24	9.15	10.07	10.98	11.90	12.81	13.73	14.64	15.56	16.47	17.39	18.30

Tabela 7.15. Visine posmatranih tačaka presjeka z [mm]

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00	31.00
2	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
3	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00	29.00
4	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00
5	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00	27.00
6	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00	26.00
7	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
8	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00
9	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00
10	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00
11	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00
12	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00
13	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
14	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00
15	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
16	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00
17	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00
18	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
19	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00
20	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00
21	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
22	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00
23	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00
24	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50	10.50
25	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
26	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
27	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
28	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
29	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
30	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
31	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
32	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
33	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
34	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Slika 7.6. Raspored posmatranih tačaka po presjeku obradka

aditivnosti. Vrijednosti logaritamskih deformacija dobijaju se na osnovu poznate veze sa relativnim deformacijama [81]:

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon). \quad (7.2)$$

Vrijednosti komponenata logaritamske deformacije i efektivne logaritamske deformacije su date u Tabeli 7.16. do Tabele 7.20., a trodimenzionalni dijagrami navedenih deformacionih komponenata na Slici 7.7. do Slike 7.11.

Tabela 7.16. Radijalna logaritamska deformacija φ_r

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.086	0.086	0.086	0.086	0.085	0.083	0.078	0.069	0.059	0.047	0.035	0.023	0.013	0.006	0.002	0.000	0.000	0.001	0.003	0.007	0.012
2	0.070	0.070	0.070	0.069	0.068	0.063	0.054	0.044	0.034	0.025	0.015	0.005	-0.004	-0.006	-0.009	-0.008	-0.003	0.001	0.008	0.018	0.028
3	0.053	0.053	0.052	0.052	0.051	0.047	0.039	0.031	0.023	0.013	0.004	-0.005	-0.013	-0.017	-0.021	-0.016	-0.010	-0.004	0.005	0.021	0.037
4	0.031	0.031	0.031	0.032	0.032	0.030	0.025	0.019	0.012	0.003	-0.006	-0.014	-0.021	-0.027	-0.029	-0.022	-0.015	-0.007	0.007	0.028	0.047
5	0.007	0.007	0.008	0.010	0.011	0.012	0.010	0.007	0.000	-0.008	-0.016	-0.023	-0.029	-0.035	-0.031	-0.025	-0.019	-0.012	0.000	0.018	0.052
6	-0.006	-0.006	-0.005	-0.003	-0.002	-0.002	-0.003	-0.006	-0.014	-0.021	-0.029	-0.036	-0.042	-0.044	-0.038	-0.031	-0.021	-0.010	0.009	0.024	0.059
7	-0.017	-0.017	-0.018	-0.018	-0.019	-0.019	-0.021	-0.027	-0.038	-0.048	-0.057	-0.064	-0.069	-0.059	-0.046	-0.033	-0.020	-0.005	0.018	0.049	0.082
8	-0.029	-0.030	-0.032	-0.035	-0.037	-0.039	-0.043	-0.053	-0.063	-0.074	-0.085	-0.094	-0.093	-0.079	-0.064	-0.049	-0.025	0.002	0.040	0.083	0.114
9	-0.046	-0.048	-0.051	-0.054	-0.056	-0.059	-0.066	-0.077	-0.089	-0.100	-0.112	-0.120	-0.105	-0.082	-0.059	-0.036	-0.013	0.015	0.053	0.121	0.150
10	-0.067	-0.068	-0.070	-0.072	-0.074	-0.077	-0.084	-0.094	-0.104	-0.113	-0.123	-0.125	-0.102	-0.079	-0.057	-0.034	0.002	0.046	0.086	0.157	0.204
11	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.089	0.094	0.100	0.105	0.110	0.116	0.090	0.064	0.037	0.002	0.054	0.114	0.156	0.218	0.233	0.208
12	0.087	0.087	0.087	0.089	0.098	0.107	0.111	0.073	0.025	0.052	0.141	0.229	0.209	0.163	0.150	0.136	0.122	0.108	0.100	0.104	0.108
13	-0.102	-0.099	-0.095	-0.093	-0.094	-0.096	-0.087	-0.051	0.009	0.128	0.219	0.269	0.271	0.242	0.219	0.209	0.199	0.190	0.174	0.150	0.125
14	-0.113	-0.106	-0.100	-0.089	-0.074	-0.058	-0.045	-0.016	0.017	0.133	0.246	0.305	0.316	0.302	0.289	0.275	0.261	0.248	0.223	0.175	0.127
15	0.114	0.106	0.097	-0.081	-0.052	-0.022	-0.002	0.009	0.023	0.120	0.246	0.347	0.374	0.363	0.338	0.316	0.297	0.278	0.235	0.156	0.078
16	-0.104	-0.096	-0.088	-0.071	-0.042	-0.012	0.011	0.027	0.040	0.115	0.240	0.347	0.411	0.426	0.400	0.373	0.344	0.315	0.249	0.146	0.043
17	-0.093	-0.083	-0.072	0.057	-0.035	-0.010	0.019	0.051	0.078	0.124	0.210	0.312	0.401	0.442	0.426	0.409	0.379	0.347	0.283	0.195	0.107
18	-0.077	-0.065	-0.051	-0.035	-0.019	-0.003	0.026	0.072	0.117	0.168	0.239	0.312	0.385	0.428	0.424	0.418	0.397	0.367	0.316	0.240	0.163
19	0.051	-0.043	-0.032	-0.019	-0.006	0.007	0.032	0.078	0.124	0.181	0.253	0.322	0.381	0.422	0.413	0.404	0.393	0.372	0.329	0.272	0.215
20	-0.014	-0.010	-0.004	0.002	0.015	0.029	0.057	0.099	0.144	0.188	0.242	0.304	0.370	0.431	0.419	0.392	0.364	0.349	0.327	0.278	0.211
21	0.017	0.020	0.024	0.029	0.043	0.059	0.088	0.127	0.164	0.201	0.244	0.303	0.361	0.418	0.489	0.504	0.495	0.452	0.357	0.192	0.079
22	0.046	0.049	0.055	0.065	0.081	0.099	0.125	0.156	0.192	0.228	0.267	0.314	0.361	0.432	0.530	0.639	0.744	0.848	0.947	0.711	0.238
23	0.046	0.051	0.061	0.082	0.106	0.149	0.195	0.244	0.304	0.369	0.474	0.621	0.763	0.903	0.769	0.176	0.528	0.894	1.229	1.486	1.461
24	0.061	0.068	0.082	0.103	0.125	0.165	0.203	0.241	0.295	0.354	0.442	0.578	0.713	0.849	0.984	1.103	1.173	1.234	1.295	1.380	1.479
25	0.078	0.086	0.099	0.120	0.138	0.166	0.199	0.233	0.278	0.331	0.361	0.368	0.363	0.318	-0.016	-0.193	0.341	0.759	1.123	1.488	1.852
26	0.078	0.083	0.091	0.104	0.119	0.132	0.150	0.171	0.196	0.221	0.245	0.284	0.323	0.356	0.364	0.368	0.372	0.339	0.292	-0.021	-0.322
27	0.120	0.123	0.128	0.134	0.144	0.152	0.160	0.171	0.185	0.201	0.218	0.235	0.253	0.271	0.279	0.246	0.186	0.127	0.068	-0.021	-0.131
28	0.142	0.146	0.152	0.157	0.163	0.168	0.173	0.177	0.185	0.194	0.202	0.207	0.209	0.211	0.212	0.199	0.169	0.138	0.105	0.054	0.001
29	0.151	0.155	0.160	0.165	0.170	0.176	0.182	0.186	0.189	0.193	0.197	0.199	0.194	0.190	0.186	0.173	0.153	0.132	0.111	0.100	0.090
30	0.162	0.164	0.165	0.167	0.171	0.175	0.180	0.183	0.184	0.185	0.186	0.187	0.182	0.176	0.171	0.163	0.154	0.145	0.135	0.124	0.113
31	0.165	0.165	0.166	0.166	0.168	0.169	0.171	0.173	0.176	0.179	0.181	0.180	0.175	0.170	0.165	0.158	0.151	0.144	0.138	0.133	0.127
32	0.159	0.160	0.162	0.164	0.164	0.162	0.160	0.159	0.161	0.164	0.167	0.167	0.167	0.166	0.165	0.160	0.154	0.148	0.146	0.148	0.150
33	0.147	0.151	0.157	0.162	0.161	0.156	0.151	0.145	0.145	0.145	0.145	0.149	0.156	0.163	0.170	0.167	0.163	0.160	0.161	0.170	0.179
34	0.143	0.147	0.151	0.156	0.152	0.144	0.135	0.127	0.127	0.128	0.128	0.136	0.146	0.157	0.168	0.171	0.174	0.178	0.183	0.191	0.199
35	0.134	0.135	0.137	0.138	0.138	0.135	0.133	0.130	0.132	0.134	0.135	0.134	0.129	0.125	0.122	0.132	0.143	0.154	0.187	0.236	0.288
36	0.112	0.113	0.117	0.121	0.123	0.126	0.127	0.126	0.128	0.132	0.137	0.138	0.139	0.110	0.089	0.070	0.038	0.003	-0.018	0.032	0.169

Tabela 7.17. Aksijalna logaritamska deformacija φ_z

$i \setminus j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.006	0.007	0.008	0.007	-0.003	-0.022	-0.048	-0.077	-0.104	-0.126	-0.139	-0.145	-0.141	-0.130	0.113	-0.097	-0.083	-0.074	-0.066	-0.060	-0.055
2	-0.005	-0.005	-0.005	-0.004	-0.003	-0.015	-0.044	-0.074	-0.104	-0.104	-0.100	-0.095	-0.089	-0.074	-0.059	-0.051	-0.049	-0.046	-0.046	-0.049	-0.052
3	0.007	0.007	0.007	0.008	0.009	-0.002	-0.030	-0.058	-0.081	-0.076	-0.072	-0.067	-0.059	-0.044	-0.030	-0.029	-0.029	-0.029	-0.033	-0.043	-0.053
4	0.023	0.023	0.023	0.023	0.022	0.013	-0.014	-0.042	-0.052	-0.047	-0.043	-0.038	-0.030	-0.015	-0.006	-0.008	-0.010	-0.012	-0.022	-0.041	-0.064
5	0.043	0.043	0.040	0.035	0.031	0.021	-0.008	-0.026	-0.025	-0.023	-0.020	-0.013	-0.002	0.012	0.012	0.008	0.005	0.002	-0.004	-0.019	-0.072
6	0.055	0.055	0.054	0.052	0.051	0.045	0.022	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.036	0.044	0.037	0.031	0.024	0.018	0.000	-0.022	-0.084
7	0.065	0.065	0.064	0.064	0.064	0.062	0.044	0.041	0.052	0.064	0.073	0.080	0.092	0.083	0.069	0.056	0.044	0.029	0.003	-0.032	-0.107
8	0.077	0.078	0.081	0.082	0.082	0.080	0.070	0.079	0.093	0.108	0.122	0.135	0.139	0.123	0.108	0.091	0.066	0.036	-0.008	-0.064	-0.144
9	0.100	0.101	0.102	0.104	0.105	0.107	0.107	0.121	0.136	0.151	0.165	0.177	0.165	0.142	0.120	0.097	0.075	0.041	-0.009	-0.102	-0.187
10	0.137	0.138	0.140	0.141	0.141	0.141	0.148	0.158	0.169	0.179	0.189	0.193	0.173	0.153	0.133	0.113	0.076	0.021	-0.038	-0.136	-0.232
11	0.175	0.174	0.173	0.173	0.172	0.173	0.178	0.183	0.188	0.193	0.193	0.174	0.151	0.127	0.090	0.029	-0.054	-0.121	-0.215	-0.268	-0.272
12	0.175	0.174	0.173	0.173	0.182	0.190	0.193	0.159	0.115	0.031	-0.097	-0.239	-0.272	-0.250	-0.243	-0.231	-0.218	-0.205	-0.198	-0.207	-0.215
13	0.203	0.199	0.195	0.191	0.189	0.187	0.177	0.144	0.090	-0.056	-0.193	-0.289	-0.325	-0.317	-0.309	-0.310	-0.311	-0.312	-0.306	-0.288	-0.270
14	0.225	0.217	0.209	0.196	0.176	0.157	0.141	0.113	0.082	-0.054	-0.208	-0.311	-0.358	-0.368	-0.371	-0.375	-0.378	-0.382	-0.369	-0.324	-0.279
15	0.227	0.218	0.209	0.191	0.155	0.118	0.093	0.080	0.065	-0.044	-0.202	-0.345	-0.404	-0.425	-0.420	-0.417	-0.418	-0.418	-0.387	-0.311	-0.234
16	0.209	0.200	0.190	0.169	0.134	0.100	0.069	0.046	0.028	-0.057	-0.209	-0.349	-0.441	-0.481	-0.477	-0.472	-0.465	-0.457	-0.405	-0.305	-0.204
17	0.187	0.176	0.165	0.145	0.121	0.089	0.050	0.009	-0.030	-0.091	-0.199	-0.324	-0.437	-0.499	-0.502	-0.505	-0.497	-0.488	-0.440	-0.355	-0.270
18	0.157	0.145	0.131	0.106	0.084	0.063	0.024	-0.035	-0.094	-0.159	-0.250	-0.345	-0.438	-0.496	-0.504	-0.511	-0.510	-0.507	-0.473	-0.402	-0.331
19	0.111	0.103	0.091	0.064	0.045	0.026	-0.007	-0.063	-0.120	-0.193	-0.284	-0.373	-0.447	-0.501	-0.499	-0.506	-0.516	-0.518	-0.488	-0.437	-0.387
20	0.050	0.049	0.041	0.013	-0.009	-0.030	-0.065	-0.118	-0.174	-0.230	-0.295	-0.372	-0.452	-0.528	-0.524	-0.508	-0.491	-0.499	-0.495	-0.451	-0.386
21	-0.006	-0.009	-0.014	-0.039	-0.070	-0.095	-0.132	-0.182	-0.231	-0.280	-0.331	-0.401	-0.469	-0.537	-0.626	-0.658	-0.665	-0.637	-0.553	-0.383	-0.261
22	-0.060	-0.064	-0.071	-0.106	-0.141	-0.170	-0.208	-0.250	-0.295	-0.339	-0.383	-0.440	-0.498	-0.585	-0.705	-0.835	-0.961	-1.085	-1.205	-0.959	-0.456
23	-0.060	-0.067	-0.090	-0.142	-0.182	-0.240	-0.299	-0.356	-0.428	-0.508	-0.637	-0.813	-0.983	-1.150	-1.021	-0.392	-0.809	-1.243	-1.642	-1.957	-1.984
24	-0.090	-0.098	-0.125	-0.180	-0.218	-0.272	-0.322	-0.368	-0.436	-0.510	-0.622	-0.790	-0.959	-1.129	-1.302	-1.461	-1.566	-1.665	-1.763	-1.875	-2.003
25	-0.128	-0.135	-0.156	-0.208	-0.244	-0.287	-0.330	-0.371	-0.426	-0.493	-0.541	-0.568	-0.583	-0.556	-0.206	-0.028	-0.635	-1.120	-1.546	-1.972	-2.398
26	-0.128	-0.132	-0.140	-0.172	-0.206	-0.232	-0.262	-0.293	-0.325	-0.358	-0.385	-0.434	-0.483	-0.527	-0.551	-0.570	-0.588	-0.568	-0.532	-0.201	0.118
27	-0.227	-0.230	-0.235	-0.243	-0.267	-0.284	-0.299	-0.317	-0.337	-0.357	-0.376	-0.396	-0.421	-0.447	-0.466	-0.440	-0.384	-0.328	-0.272	-0.172	0.048
28	-0.277	-0.281	-0.287	-0.292	-0.311	-0.322	-0.332	-0.342	-0.352	-0.362	-0.372	-0.379	-0.386	-0.394	-0.401	-0.391	-0.360	-0.329	-0.296	-0.237	0.176
29	-0.290	-0.294	-0.295	-0.305	-0.326	-0.337	-0.347	-0.355	-0.360	-0.366	-0.372	-0.376	-0.374	-0.372	-0.370	-0.359	-0.337	-0.316	-0.294	-0.278	0.262
30	-0.313	-0.313	-0.314	-0.316	-0.332	-0.340	-0.347	-0.351	-0.355	-0.358	-0.362	-0.364	-0.359	-0.354	-0.349	-0.342	-0.332	-0.322	-0.310	-0.297	-0.283
31	-0.325	-0.326	-0.326	-0.327	-0.334	-0.336	-0.338	-0.339	-0.343	-0.346	-0.350	-0.350	-0.346	-0.342	-0.338	-0.331	-0.324	-0.316	-0.309	-0.301	-0.294
32	-0.316	-0.317	-0.315	-0.320	-0.322	-0.323	-0.323	-0.323	-0.324	-0.325	-0.325	-0.328	-0.330	-0.333	-0.335	-0.329	-0.321	-0.314	-0.310	-0.312	-0.315
33	-0.291	-0.296	-0.302	-0.308	-0.312	-0.313	-0.313	-0.313	-0.307	-0.302	-0.297	-0.301	-0.310	-0.319	-0.328	-0.325	-0.322	-0.319	-0.321	-0.336	-0.340
34	-0.283	-0.287	-0.291	-0.295	-0.298	-0.293	-0.288	-0.282	-0.277	-0.272	-0.268	-0.275	-0.288	-0.300	-0.313	-0.318	-0.323	-0.328	-0.336	-0.346	-0.356
35	-0.264	-0.264	-0.266	-0.267	-0.273	-0.272	-0.271	-0.270	-0.270	-0.270	-0.270	-0.268	-0.265	-0.262	-0.261	-0.270	-0.278	-0.287	-0.323	-0.375	-0.439
36	-0.218	-0.219	-0.223	-0.230	-0.235	-0.241	-0.246	-0.249	-0.255	-0.260	-0.264	-0.264	-0.256	-0.241	-0.223	-0.203	-0.167	-0.126	-0.102	-0.140	-0.257

Tabela 7.18. Obodna logaritamska deformacija φ_θ

$i \setminus j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-0.092	-0.093	-0.094	-0.093	-0.081	-0.059	-0.027	0.011	0.048	0.080	0.104	0.119	0.126	0.122	0.110	0.095	0.082	0.071	0.061	0.051	0.043
2	-0.065	-0.065	-0.065	-0.066	-0.066	-0.049	-0.010	0.029	0.069	0.079	0.084	0.089	0.092	0.080	0.067	0.058	0.050	0.043	0.036	0.031	0.025
3	-0.059	-0.059	-0.060	-0.060	-0.060	-0.046	-0.010	0.027	0.058	0.062	0.067	0.071	0.072	0.060	0.049	0.043	0.037	0.031	0.026	0.022	0.019
4	-0.054	-0.054	-0.054	-0.054	-0.054	-0.043	-0.010	0.023	0.040	0.044	0.048	0.053	0.051	0.041	0.033	0.028	0.024	0.019	0.015	0.014	0.020
5	-0.050	-0.050	-0.047	-0.045	-0.042	-0.032	-0.001	0.019	0.025	0.031	0.036	0.036	0.031	0.023	0.017	0.011	0.006	0.000	0.000	0.001	0.022
6	-0.049	-0.049	-0.049	-0.049	-0.048	-0.043	-0.018	0.002	0.004	0.006	0.009	0.011	0.006	-0.001	-0.005	-0.008	-0.011	-0.013	-0.012	-0.002	0.026
7	-0.048	-0.048	-0.047	-0.046	-0.045	-0.043	-0.022	-0.013	-0.013	-0.013	-0.014	-0.015	-0.024	-0.026	-0.026	-0.027	-0.027	-0.027	-0.022	-0.009	0.028
8	-0.048	-0.049	-0.050	-0.048	-0.045	-0.041	-0.026	-0.026	-0.029	-0.033	-0.036	-0.039	-0.045	-0.046	-0.048	-0.049	-0.045	-0.039	-0.027	-0.009	0.033
9	-0.054	-0.052	-0.051	-0.049	-0.047	-0.046	-0.040	-0.043	-0.046	-0.049	-0.053	-0.057	-0.060	-0.061	-0.062	-0.064	-0.065	-0.056	-0.036	-0.008	0.040
10	-0.070	-0.070	-0.069	-0.068	-0.067	-0.065	-0.064	-0.066	-0.067	-0.069	-0.070	-0.072	-0.075	-0.078	-0.081	-0.084	-0.080	-0.065	-0.039	-0.007	0.035
11	-0.088	-0.087	-0.087	-0.086	-0.086	-0.085	-0.084	-0.084	-0.083	-0.083	-0.083	-0.086	-0.089	-0.091	-0.093	-0.081	-0.054	-0.025	0.008	0.039	0.064
12	-0.088	-0.087	-0.086	-0.085	-0.084	-0.083	-0.083	-0.088	-0.092	-0.082	-0.036	0.019	0.063	0.086	0.093	0.095	0.096	0.097	0.099	0.103	0.107
13	-0.101	-0.101	-0.100	-0.098	-0.094	-0.091	-0.090	-0.094	-0.099	-0.069	-0.020	0.025	0.055	0.074	0.090	0.101	0.112	0.124	0.132	0.137	0.141
14	-0.112	-0.110	-0.109	-0.106	-0.101	-0.095	-0.093	-0.096	-0.098	-0.078	-0.037	0.005	0.040	0.067	0.087	0.104	0.120	0.137	0.146	0.149	0.152
15	-0.113	-0.112	-0.112	-0.110	-0.103	-0.097	-0.091	-0.089	-0.088	-0.079	-0.047	-0.008	0.025	0.056	0.080	0.101	0.121	0.140	0.152	0.154	0.156
16	-0.104	-0.103	-0.103	-0.099	-0.094	-0.089	-0.081	0.074	-0.068	-0.059	-0.038	-0.008	0.026	0.054	0.079	0.103	0.124	0.144	0.156	0.158	0.160
17	-0.094	-0.093	-0.092	-0.087	-0.083	-0.077	-0.070	-0.060	-0.048	-0.035	-0.017	0.006	0.035	0.060	0.084	0.109	0.128	0.146	0.157	0.160	0.164
18	-0.081	-0.080	-0.079	-0.071	-0.065	-0.059	-0.049	-0.037	-0.024	-0.012	0.005	0.025	0.048	0.071	0.092	0.113	0.130	0.145	0.157	0.162	0.168
19	-0.061	-0.060	-0.058	-0.045	-0.040	-0.034	-0.026	-0.015	-0.004	0.011	0.027	0.044	0.063	0.082	0.102	0.119	0.135	0.149	0.159	0.165	0.171
20	-0.037	-0.040	-0.038	-0.016	0.006	0.001	0.009	0.019	0.030	0.042	0.053	0.068	0.082	0.099	0.120	0.139	0.158	0.162	0.165	0.170	0.175
21	0.011	0.011	0.011	0.009	0.026	0.035	0.045	0.055	0.067	0.078	0.086	0.097	0.108	0.119	0.136	0.156	0.177	0.197	0.198	0.181	0.181
22	0.014	0.015	0.016	0.041	0.060	0.071	0.082	0.093	0.103	0.111	0.118	0.128	0.138	0.155	0.176	0.197	0.217	0.237	0.257	0.253	0.228
23	0.014	0.015	0.028	0.060	0.076	0.090	0.104	0.113	0.126	0.140	0.165	0.193	0.221	0.248	0.256	0.226	0.289	0.353	0.415	0.472	0.522
24	0.029	0.030	0.044	0.077	0.093	0.107	0.119	0.127	0.141	0.156	0.181	0.214	0.247	0.281	0.320	0.358	0.389	0.426	0.464	0.497	0.527
25	0.050	0.049	0.056	0.088	0.105	0.120	0.130	0.137	0.148	0.163	0.182	0.202	0.223	0.241	0.229	0.229	0.299	0.361	0.421	0.480	0.540
26	0.050	0.049	0.048	0.067	0.087	0.100	0.111	0.122	0.129	0.136	0.139	0.150	0.161	0.173	0.188	0.204	0.219	0.232	0.245	0.228	0.213
27	0.108	0.107	0.107	0.109	0.123	0.131	0.139	0.146	0.151	0.155	0.159	0.161	0.169	0.177	0.186	0.194	0.198	0.201	0.205	0.193	0.178

7. Zapreminsko deformisanje u otvorenim kalupima

Tabela 7.18. Obodna logaritamska deformacija φ_θ (nastavak)

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
28	0.135	0.135	0.135	0.135	0.147	0.154	0.160	0.165	0.167	0.169	0.170	0.172	0.178	0.183	0.189	0.192	0.191	0.191	0.190	0.183	0.175
29	0.139	0.140	0.140	0.141	0.157	0.161	0.166	0.169	0.171	0.173	0.176	0.177	0.179	0.182	0.184	0.185	0.184	0.183	0.182	0.177	0.173
30	0.150	0.150	0.149	0.148	0.161	0.164	0.167	0.169	0.171	0.173	0.176	0.177	0.177	0.178	0.178	0.178	0.177	0.176	0.175	0.173	0.170
31	0.160	0.160	0.161	0.161	0.166	0.166	0.166	0.166	0.167	0.168	0.169	0.170	0.172	0.173	0.175	0.174	0.173	0.171	0.170	0.168	0.167
32	0.157	0.157	0.156	0.156	0.159	0.161	0.163	0.166	0.163	0.161	0.159	0.160	0.163	0.166	0.169	0.168	0.167	0.166	0.165	0.165	0.164
33	0.145	0.145	0.145	0.146	0.151	0.156	0.161	0.166	0.161	0.157	0.152	0.154	0.157	0.159	0.159	0.159	0.159	0.158	0.159	0.160	0.161
34	0.140	0.140	0.140	0.140	0.146	0.150	0.153	0.156	0.150	0.145	0.139	0.139	0.141	0.144	0.146	0.147	0.149	0.150	0.153	0.155	0.158
35	0.125	0.125	0.125	0.129	0.135	0.137	0.138	0.139	0.137	0.136	0.134	0.134	0.136	0.137	0.139	0.137	0.135	0.133	0.137	0.144	0.152
36	0.106	0.105	0.106	0.109	0.113	0.117	0.121	0.124	0.125	0.126	0.126	0.126	0.128	0.131	0.133	0.134	0.132	0.127	0.121	0.106	0.088

Tabela 7.19. Smičuća deformacija γ_{rz}

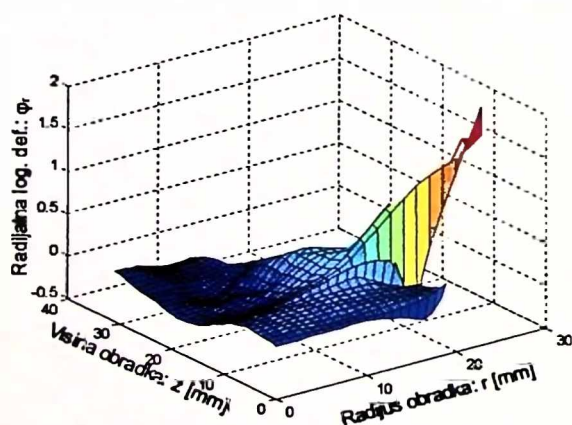
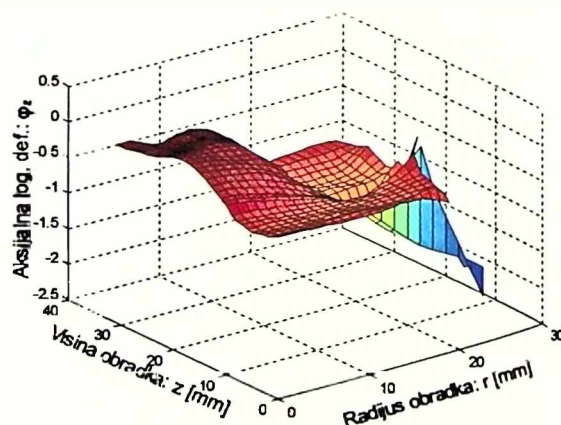
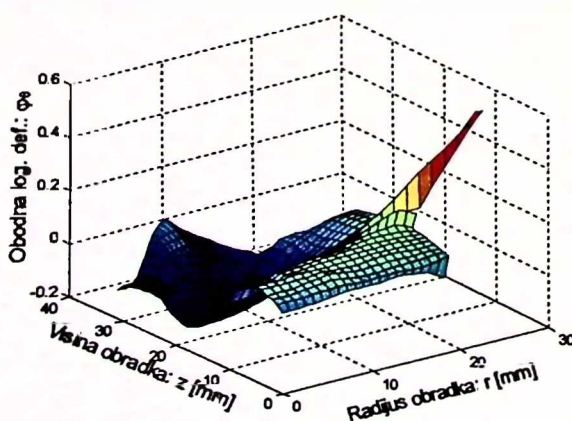
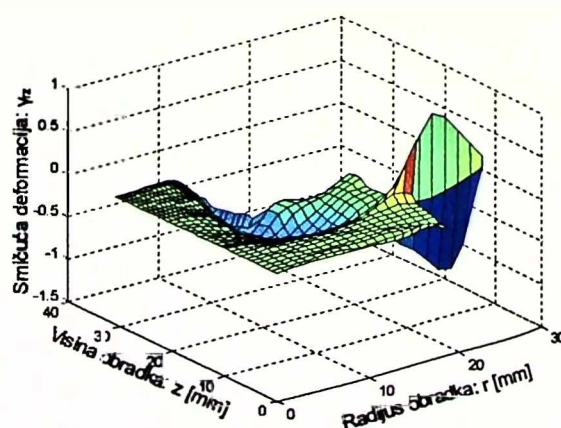
i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.002	0.004	0.006	0.008	0.011	0.013	0.015	0.018	0.021	0.024	0.027	0.030	0.032	0.031	0.020	0.002	-0.022	-0.059	-0.104	-0.148	
2	0.002	0.004	0.007	0.010	0.012	0.015	0.018	0.021	0.021	0.019	0.018	0.013	-0.010	-0.033	-0.071	-0.124	-0.177	-0.222	-0.241	-0.260	
3	0.002	0.004	0.007	0.010	0.012	0.015	0.017	0.018	0.014	0.009	0.005	-0.006	-0.034	-0.062	-0.123	-0.185	-0.247	-0.294	-0.312	-0.331	
4	0.002	0.004	0.007	0.009	0.011	0.013	0.014	0.011	0.005	-0.002	-0.008	-0.024	-0.054	-0.092	-0.161	-0.231	-0.301	-0.346	-0.366	-0.329	
5	0.000	0.003	0.004	0.005	0.005	0.006	0.004	0.003	-0.003	-0.010	-0.016	-0.023	-0.041	-0.071	-0.133	-0.203	-0.273	-0.343	-0.396	-0.433	-0.316
6	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	-0.004	-0.009	-0.014	-0.019	-0.043	-0.082	-0.137	-0.192	-0.275	-0.361	-0.425	-0.422	-0.298
7	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	0.000	0.000	-0.002	-0.005	-0.009	-0.016	-0.045	-0.100	-0.164	-0.234	-0.305	-0.368	-0.410	-0.438	-0.293
8	0.000	-0.002	-0.003	-0.003	-0.006	-0.010	-0.017	-0.024	-0.032	-0.040	-0.051	-0.085	-0.143	-0.197	-0.252	-0.319	-0.376	-0.401	-0.401	-0.274	
9	0.000	-0.001	-0.002	-0.002	-0.003	-0.004	-0.010	-0.022	-0.034	-0.046	-0.058	-0.074	-0.115	-0.165	-0.214	-0.264	-0.314	-0.375	-0.415	-0.388	-0.250
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.011	-0.026	-0.041	-0.056	-0.070	-0.093	-0.143	-0.194	-0.245	-0.296	-0.343	-0.376	-0.413	-0.380	-0.270
11	0.000	-0.002	-0.003	-0.005	-0.007	-0.014	-0.033	-0.053	-0.072	-0.092	-0.123	-0.184	-0.248	-0.312	-0.368	-0.388	-0.395	-0.417	-0.354	-0.258	-0.171
12	0.000	-0.003	-0.006	-0.014	-0.046	-0.078	-0.122	-0.226	-0.329	-0.388	-0.412	-0.325	-0.174	-0.109	-0.106	-0.128	-0.154	-0.180	-0.185	-0.135	-0.081
13	0.000	-0.007	-0.014	-0.030	-0.068	-0.111	-0.177	-0.286	-0.399	-0.409	-0.412	-0.325	-0.213	-0.166	-0.140	-0.127	-0.114	-0.101	-0.060	-0.006	0.048
14	0.000	-0.013	-0.024	-0.047	-0.085	-0.123	-0.194	-0.290	-0.384	-0.425	-0.424	-0.406	-0.335	-0.207	-0.155	-0.127	-0.099	-0.070	-0.025	0.020	0.070
15	0.000	-0.017	-0.034	-0.056	-0.088	-0.120	-0.181	-0.281	-0.376	-0.401	-0.427	-0.435	-0.411	-0.334	-0.262	-0.198	-0.139	-0.080	-0.028	0.014	0.055
16	0.000	-0.022	-0.044	-0.070	-0.104	-0.138	-0.198	-0.277	-0.359	-0.391	-0.401	-0.421	-0.431	-0.388	-0.301	-0.216	-0.142	-0.067	-0.029	-0.021	-0.013
17	0.000	-0.024	-0.048	-0.074	-0.105	-0.139	-0.188	-0.247	-0.311	-0.357	-0.380	-0.396	-0.404	-0.389	-0.328	-0.250	-0.171	-0.092	-0.051	-0.040	-0.029
18	0.000	-0.022	-0.044	-0.067	-0.098	-0.128	-0.169	-0.216	-0.263	-0.302	-0.327	-0.348	-0.366	-0.370	-0.324	-0.265	-0.181	-0.102	-0.061	-0.044	-0.026
19	0.000	-0.022	-0.044	-0.066	-0.094	-0.121	-0.154	-0.193	-0.231	-0.265	-0.287	-0.308	-0.327	-0.338	-0.315	-0.268	-0.220	-0.142	-0.087	-0.057	-0.028
20	0.000	-0.023	-0.045	-0.067	-0.094	-0.122	-0.151	-0.181	-0.210	-0.239	-0.258	-0.276	-0.294	-0.314	-0.339	-0.355	-0.368	-0.261	-0.154	-0.096	-0.059
21	0.000	-0.017	-0.035	-0.056	-0.079	-0.103	-0.126	-0.148	-0.171	-0.194	-0.217	-0.234	-0.251	-0.269	-0.299	-0.326	-0.351	-0.377	-0.387	-0.324	-0.217
22	0.000	-0.012	-0.025	-0.039	-0.057	-0.076	-0.094	-0.112	-0.128	-0.143	-0.158	-0.169	-0.180	-0.191	-0.190	-0.183	-0.228	-0.294	-0.403	-0.546	-0.622
23	0.000	-0.016	-0.034	-0.058	-0.083	-0.107	-0.129	-0.150	-0.167	-0.182	-0.194	-0.185	-0.240	-0.328	-0.537	-0.645	-0.803	-0.960	-1.000	-0.749	-0.151
24	0.000	-0.016	-0.031	-0.053	-0.078	-0.094	-0.108	-0.119	-0.124	-0.128	-0.128	-0.117	-0.107	-0.094	-0.075	-0.072	-0.078	-0.035	0.008	0.063	0.126
25	0.000	-0.015	-0.029	-0.049	-0.073	-0.089	-0.098	-0.100	-0.093	-0.084	-0.052	0.016	0.095	0.202	0.457	0.732	0.934	0.863	0.664	0.464	0.265
26	0.000	-0.012	-0.021	-0.032	-0.048	-0.066	-0.081	-0.091	-0.097	-0.102	-0.099	-0.092	-0.086	-0.073	-0.032	0.020	0.073	0.152	0.237	0.461	0.682
27	0.000	-0.007	-0.015	-0.023	-0.034	-0.046	-0.057	-0.063	-0.064	-0.065	-0.066	-0.057	-0.046	-0.032	-0.014	0.025	0.075	0.126	0.176	0.149	0.105
28	0.000	-0.001	-0.002	-0.003	-0.010	-0.017	-0.023	-0.024	-0.024	-0.024	-0.025	-0.020	-0.008	0.004	0.015	0.031	0.047	0.064	0.076	0.051	0.023
29	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.004	-0.004	-0.005	-0.003	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001	0.009	0.018	0.028	0.035	0.038	0.041	0.042	0.026	0.010
30	0.000	-0.002	-0.004	-0.006	-0.005	-0.002	0.002	0.006	0.007	0.009	0.011	0.012	0.017	0.022	0.027	0.030	0.030	0.031	0.029	0.017	0.004
31	0.000	0.003	0.006	0.009	0.011	0.011	0.011	0.011	0.018	0.026	0.033	0.035	0.031	0.026	0.022	0.019	0.017	0.014	0.010	0.005	-0.001
32	0.000	0.005	0.011	0.017	0.017	0.014	0.011	0.009	0.015	0.020	0.026	0.029	0.027	0.026	0.025	0.016	0.006	-0.003	-0.011	-0.013	-0.015
33	0.000	0.003	0.006	0.009	0.010	0.010	0.011	0.012	0.016	0.021	0.026	0.031	0.035	0.039	0.043	0.030	0.016	0.003	-0.011	-0.033	-0.054
34	0.000	0.004	0.008	0.012	0.018	0.022	0.027	0.031	0.031	0.030	0.030	0.034	0.039	0.045	0.049	0.037	0.025	0.012	-0.007	-0.034	-0.060
35	0.000	0.005	0.011	0.016	0.023	0.030	0.037	0.040	0.030	0.021	0.012	0.014	0.019	0.025	0.030	0.042	0.054	0.066	0.052	0.013	-0.037
36	0.000	0.010	0.021	0.031	0.036	0.039	0.042	0.043	0.041	0.038	0.036	0.036	0.033	0.026	0.021	0.023	0.040	0.062	0.075	0.058	0.014

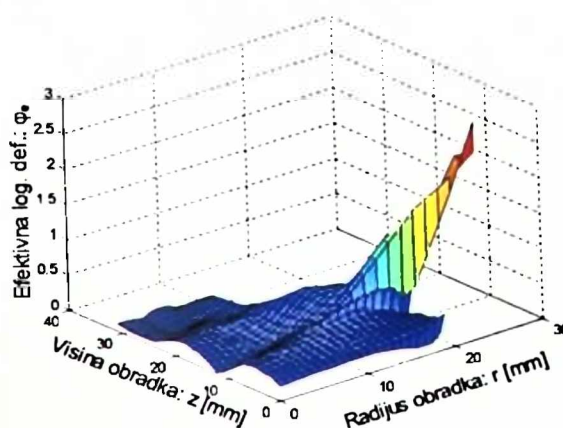
Tabela 7.20. Efektivna deformacija φ_e

Tabela 7.20: Efektivna deformacija ψ_e																					
$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.104	0.104	0.105	0.104	0.096	0.085	0.078	0.085	0.106	0.128	0.146	0.155	0.155	0.147	0.130	0.112	0.095	0.084	0.081	0.088	0.103
2	0.081	0.078	0.078	0.078	0.077	0.067	0.058	0.075	0.106	0.109	0.108	0.107	0.105	0.089	0.076	0.075	0.091	0.114	0.137	0.148	0.159
3	0.069	0.065	0.065	0.065	0.065	0.054	0.042	0.059	0.084	0.082	0.080	0.080	0.077	0.066	0.062	0.083	0.114	0.147	0.173	0.186	0.199
4	0.060	0.055	0.055	0.055	0.055	0.045	0.026	0.043	0.054	0.053	0.053	0.055	0.053	0.052	0.064	0.098	0.135	0.175	0.201	0.215	0.201
5	0.059	0.054	0.051	0.047	0.044	0.033	0.011	0.027	0.029	0.032	0.038	0.039	0.042	0.054	0.082	0.119	0.158	0.198	0.229	0.251	0.197
6	0.063	0.061	0.060	0.058	0.057	0.051	0.023	0.007	0.015	0.022	0.030	0.039	0.052	0.070	0.090	0.117	0.161	0.209	0.245	0.245	0.193
7	0.068	0.067	0.067	0.066	0.066	0.063	0.044	0.041	0.054	0.066	0.077	0.085	0.099	0.103	0.118	0.147	0.182	0.215	0.238	0.257	0.203
8	0.079	0.079	0.082	0.083	0.082	0.080	0.071	0.081	0.096	0.111	0.127	0.142	0.150	0.150	0.158	0.173	0.196	0.221	0.235	0.251	0.220
9	0.101	0.101	0.102	0.103	0.105	0.106	0.108	0.123	0.139	0.155	0.172	0.186	0.180	0.172	0.173	0.182	0.199	0.226	0.245	0.259	0.245
10	0.137	0.138	0.139	0.141	0.141	0.142	0.149	0.160	0.172	0.184	0.197	0.204	0.194	0.191	0.196	0.208	0.218	0.227	0.252	0.277	0.298
11	0.175	0.174	0.173	0.173	0.172	0.174	0.179	0.186	0.193	0.201	0.207	0.204	0.209	0.223	0.237	0.239	0.256	0.291	0.323	0.328	0.301
12	0.175	0.174	0.173	0.174	0.184	0.196	0.207	0.206	0.226	0.239	0.277	0.329	0.302	0.261	0.253	0.244	0.236	0.230	0.226	0.221	0.220
13	0.204	0.199	0.195	0.192	0.193	0.198	0.205	0.221	0.255	0.269	0.337	0.373	0.370	0.345	0.327	0.324	0.322	0.320	0.309	0.288	0.270
14	0.225	0.217	0.209	0.198	0.183	0.173	0.182	0.207	0.245	0.279	0.361	0.426	0.436	0.410	0.401	0.396	0.392	0.390	0.372	0.325	0.282

Tabela 7.20. Efektivna deformacija φ_e (nastavak)

i \ j →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
15	0.227	0.218	0.211	0.195	0.166	0.144	0.149	0.189	0.236	0.262	0.360	0.472	0.509	0.498	0.470	0.450	0.437	0.428	0.391	0.311	0.240
16	0.209	0.200	0.192	0.175	0.151	0.135	0.144	0.176	0.218	0.253	0.350	0.470	0.552	0.572	0.541	0.514	0.490	0.470	0.409	0.305	0.215
17	0.187	0.177	0.167	0.152	0.138	0.126	0.130	0.157	0.196	0.243	0.323	0.432	0.538	0.591	0.574	0.557	0.531	0.506	0.447	0.356	0.273
18	0.157	0.146	0.134	0.115	0.105	0.102	0.109	0.144	0.196	0.257	0.340	0.430	0.522	0.579	0.574	0.567	0.548	0.528	0.483	0.405	0.331
19	0.112	0.104	0.095	0.076	0.073	0.078	0.095	0.139	0.194	0.265	0.352	0.441	0.518	0.573	0.566	0.559	0.556	0.541	0.500	0.443	0.388
20	0.053	0.054	0.053	0.042	0.057	0.078	0.113	0.164	0.222	0.281	0.348	0.427	0.511	0.591	0.590	0.574	0.558	0.536	0.511	0.458	0.388
21	0.018	0.022	0.032	0.052	0.084	0.113	0.153	0.205	0.257	0.309	0.365	0.439	0.512	0.585	0.680	0.714	0.721	0.693	0.604	0.423	0.295
22	0.064	0.068	0.076	0.109	0.145	0.176	0.216	0.261	0.308	0.356	0.404	0.464	0.525	0.617	0.742	0.880	1.017	1.153	1.290	1.045	0.583
23	0.064	0.070	0.094	0.147	0.189	0.250	0.312	0.375	0.451	0.535	0.671	0.857	1.041	1.225	1.109	0.544	0.945	1.398	1.804	2.088	2.059
24	0.092	0.101	0.129	0.183	0.224	0.279	0.331	0.380	0.451	0.528	0.645	0.821	0.998	1.177	1.358	1.524	1.630	1.728	1.826	1.947	2.081
25	0.129	0.137	0.159	0.211	0.248	0.293	0.337	0.379	0.436	0.505	0.553	0.577	0.592	0.571	0.365	0.489	0.835	1.247	1.643	2.072	2.517
26	0.129	0.134	0.143	0.174	0.209	0.236	0.266	0.299	0.332	0.366	0.394	0.444	0.495	0.540	0.561	0.579	0.597	0.579	0.552	0.364	0.513
27	0.229	0.231	0.235	0.244	0.268	0.285	0.300	0.320	0.339	0.359	0.380	0.400	0.425	0.451	0.469	0.441	0.387	0.339	0.302	0.229	0.194
28	0.277	0.281	0.287	0.293	0.311	0.322	0.332	0.342	0.353	0.363	0.373	0.380	0.387	0.394	0.401	0.392	0.361	0.332	0.303	0.250	0.203
29	0.290	0.294	0.300	0.306	0.327	0.337	0.348	0.355	0.360	0.366	0.373	0.376	0.374	0.372	0.370	0.359	0.338	0.318	0.297	0.282	0.267
30	0.313	0.313	0.314	0.316	0.332	0.340	0.347	0.351	0.355	0.358	0.362	0.364	0.359	0.354	0.349	0.342	0.332	0.322	0.312	0.298	0.285
31	0.325	0.326	0.326	0.327	0.334	0.336	0.338	0.339	0.343	0.347	0.351	0.351	0.347	0.343	0.339	0.332	0.324	0.316	0.309	0.302	0.295
32	0.316	0.317	0.319	0.320	0.323	0.323	0.323	0.324	0.324	0.325	0.326	0.328	0.330	0.333	0.335	0.329	0.321	0.314	0.311	0.313	0.315
33	0.291	0.296	0.302	0.308	0.312	0.312	0.312	0.312	0.307	0.302	0.297	0.302	0.311	0.321	0.330	0.326	0.322	0.319	0.320	0.331	0.342
34	0.283	0.287	0.291	0.296	0.298	0.293	0.289	0.283	0.278	0.273	0.268	0.275	0.288	0.302	0.315	0.319	0.324	0.329	0.336	0.347	0.359
35	0.264	0.265	0.266	0.267	0.273	0.273	0.272	0.270	0.270	0.270	0.270	0.268	0.265	0.263	0.261	0.271	0.280	0.290	0.326	0.383	0.447
36	0.218	0.219	0.224	0.231	0.237	0.243	0.248	0.251	0.255	0.260	0.264	0.265	0.257	0.241	0.225	0.207	0.178	0.151	0.137	0.150	0.261

Slika 7.7. Radijalna logaritamska deformacija: φ_r Slika 7.8. Aksijalna logaritamska deformacija: φ_z Slika 7.9. Obodna logaritamska deformacija φ_θ Slika 7.10. Smičuća deformacija γ_{rz}

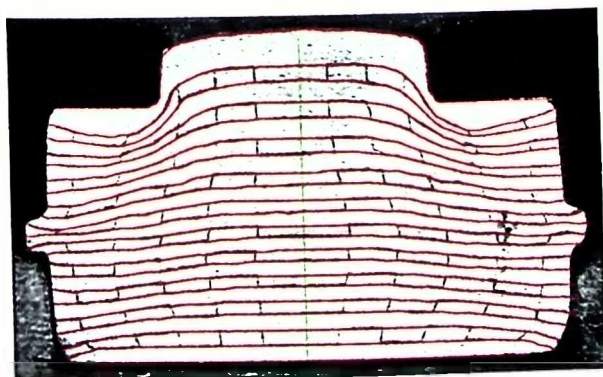


Slika 7.11. Efektivna logaritamska deformacija φ_e

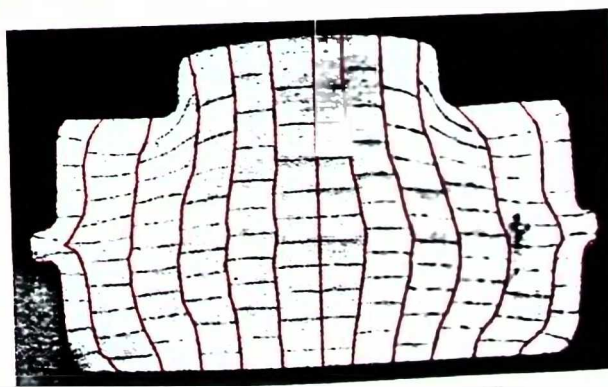
7.1.2. Određivanje brzina deformacija

Kompletna naponsko deformaciona analiza podrazumijeva i kinematsku analizu, tj. određivanje komponentata tenzora brzina deformacija (3.29). Osnovu kinematske analize predstavlja određivanje brzina pomjeranja. S obzirom da je proces deformisanja u otvorenim kalupima nestacionaran proces, brzine pomjeranja određuju se na osnovu pomjeranja tačaka (3.48) na početku i kraju konačnog intervala deformacije, pod pretpostavkom konstantne brzine deformisanja, što je i bio slučaj. Ovaj interval mora biti dovoljno mali da može da odražava pravo stanje brzina pomjeranja, ali ne i suviše mali kako bi se izbjegao uticaj anizotropije deformisanja. Iskustveno i iz literature [92] je utvrđeno da je optimalan interval deformacije na kraju procesa deformisanja za priraštaj hoda alata $\Delta z = 2$ [mm].

Na početku usvojenog intervala deformacije neophodno je bilo odrediti deformisanu sliku meridijalnog presjeka obradka. Proces deformisanja se zaustavlja za postignutu vrijednost randog hoda alata koji obezbeđuje usvojenu vrijednost priraštaja hoda, tj. za visinu vijenca: $h_v = 3$ [mm], koju obezbeđuje čelični prsten iste visine, koji se ubaca između gornjeg i donjeg kalupa. Proces pripreme površine presjeka obradka, kao i digitalizacija slike deformisane mreže u meridijalnom presjeku je isti kao i za završetak procesa deformisanja, što je opisano u prethodnoj tački kod određivanja deformacionog stanja. Takođe je identično i postavljanje radijalnih i aksijalnih linija kod kojih se koristi i identičan broj tačaka. Dobijena digitalizovana slika presjeka na početku posmatranog intervala deformacije sa postavljenim radijalnim i aksijalnim linijama data je na Slici 7.12. i Slici 7.13.



Slika 7.12. Deformisane radijalne linije mreže na početku posmatranog intervala



Slika 7.13. Deformisane aksijalne linije mreže na početku posmatranog intervala

Vrijednosti koordinata tačaka radijalnih i aksijalnih linija su date u Tabeli 7.21. do Tabele 7.24. Koordinate tačaka na kraju procesa deformisanja, odnosno na kraju posmatranog intervala su obilježene oznakom B u indeksu, dok se u ovom slučaju obilježavaju sa oznakom A, koja predstavlja početak posmatranog intervala.

Tabela 7.21. Radijusi tačaka aksijalnih linija na početku posmatranog intervala r_{az} [mm]

i↓ j→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_z=13$
1	-18.67	-15.75	-12.43	-9.64	-6.47	-3.40	0.00	2.14	5.03	8.20	10.07	14.87	17.83
2	-19.31	-16.77	-12.57	-9.40	-6.29	-3.37	0.00	2.17	5.07	8.10	11.59	16.53	18.50
3	-19.73	-17.51	-12.64	-9.29	-6.19	-3.33	0.00	2.14	5.10	7.96	12.23	16.81	18.82
4	-19.98	-17.86	-12.78	-9.22	-6.12	-3.26	0.00	2.17	5.28	7.89	12.83	17.06	19.00
5	-20.15	-17.86	-13.03	-9.19	-6.12	-3.22	0.00	2.21	5.31	7.85	13.11	17.06	19.10
6	-20.26	-17.72	-13.52	-9.15	-6.12	-3.15	0.00	2.28	5.56	7.85	13.50	17.30	19.56
7	-20.61	-18.00	-13.81	-8.94	-6.15	-3.15	0.00	2.42	6.05	8.06	13.67	17.80	19.77
8	-21.10	-18.67	-13.84	-8.94	-6.29	-3.15	0.00	2.56	6.69	8.20	14.02	18.15	20.20
9	-21.60	-19.17	-13.95	-9.22	-6.79	-3.15	0.00	2.74	7.08	8.59	14.38	18.36	20.69
0	-21.99	-19.52	-14.16	-9.50	-6.89	-3.44	0.00	2.90	7.18	9.09	14.45	18.40	21.04
11	-22.20	-18.74	-14.30	-9.89	-7.00	-3.40	0.00	3.27	7.11	9.65	14.38	17.90	21.26
12	-22.09	-18.43	-14.33	-10.38	-6.86	-3.29	0.00	3.48	6.97	10.18	14.20	17.76	21.11
13	-21.67	-18.00	-14.58	-10.60	-7.07	-3.29	0.00	3.50	6.86	10.64	14.00	17.59	20.90
14	-20.61	-17.72	-14.44	-10.60	-7.25	-3.40	0.00	3.41	6.69	10.74	13.71	17.38	20.59
15	-20.26	-17.54	-14.44	-10.88	-7.10	-3.58	0.00	3.41	6.41	10.74	13.04	17.23	20.20
16	-20.00	-17.33	-14.09	-10.74	-6.89	-3.37	0.00	3.13	6.12	10.43	12.44	16.88	19.95
17	-19.56	-17.05	-13.59	-10.50	-6.54	-3.22	0.00	2.84	5.77	9.76	12.08	16.39	19.56
18	-19.10	-16.73	-13.17	-9.78	-6.40	-3.19	0.00	2.60	5.56	9.09	11.84	15.79	18.86
19	-18.60	-16.49	-12.54	-9.43	-6.26	-3.12	0.00	2.38	5.49	8.56	11.66	15.22	18.01
$i_z=20$	-17.40	-15.57	-12.29	-9.29	-6.22	-3.10	0.00	2.31	5.38	8.38	11.59	14.98	16.49

Tabela 7.22. Visine tačaka aksijalnih linija na početku posmatranog intervala z_{az} [mm]

i↓ j→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_z=13$
1	23.41	23.41	23.46	29.14	29.55	29.96	30.29	30.05	30.13	29.20	23.50	23.62	23.58
2	22.67	21.97	22.59	27.24	27.66	28.81	28.27	27.99	28.20	27.86	21.60	21.20	22.96
3	22.06	20.66	22.10	26.63	26.30	28.20	27.53	26.67	25.02	26.38	20.57	20.66	22.47
4	20.78	18.56	21.27	26.17	24.53	27.24	26.79	25.27	22.26	25.27	19.67	18.76	22.14
5	14.31	17.61	20.45	25.80	22.96	25.89	26.26	23.33	19.91	24.57	18.68	14.77	21.73
6	13.65	15.80	19.42	25.50	21.56	24.36	25.50	21.93	18.39	23.83	14.73	13.74	13.65
7	13.24	14.15	18.14	24.00	19.67	22.88	24.00	20.29	16.66	21.97	13.37	12.79	13.33
8	13.00	12.71	16.99	22.50	18.27	20.61	22.50	18.64	13.57	20.82	11.97	11.80	13.00
9	13.00	11.84	15.84	20.16	15.63	17.73	21.00	17.07	11.88	19.54	10.94	11.20	13.00
0	12.63	11.55	14.20	17.73	14.44	15.71	19.50	15.92	10.98	17.77	9.45	10.44	12.63
11	12.01	11.10	12.20	16.54	13.24	13.65	18.00	13.53	10.07	15.47	7.97	9.04	11.43
12	10.44	10.48	11.23	14.60	12.20	12.38	16.84	12.20	9.17	13.28	6.82	7.68	10.24
13	10.00	8.84	10.07	12.75	11.06	11.43	14.74	11.20	7.81	11.39	5.79	5.38	10.00
14	10.00	7.07	8.96	11.64	9.29	10.73	12.63	10.07	6.74	9.99	4.72	4.35	10.00
15	9.78	4.68	7.81	9.82	8.20	9.12	10.53	9.04	5.42	8.38	3.40	3.32	9.58
16	9.17	3.15	5.67	7.77	6.37	7.27	8.42	6.86	4.20	6.74	2.70	2.41	8.84
17	2.62	1.88	3.89	6.12	4.84	4.55	6.32	4.39	2.87	4.68	2.08	1.88	2.82
18	0.89	1.46	2.91	4.21	2.82	2.82	4.21	2.87	1.55	3.03	1.51	1.38	0.81
19	0.00	1.34	1.34	2.11	1.09	1.55	2.11	1.46	0.93	1.34	0.64	0.76	0.00
$i_z=20$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabela 7.23. Radijusi tačaka radijalnih linija na početku posmatranog intervala r_{ar} [mm]

$i=22$	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	$i=1$
-17.40	-19.03	-19.48	-19.73	-20.00	-20.00	-20.00	-20.23	-20.83	-22.45	-22.52	-22.34	-20.97	-20.44	-20.33	-20.37	-20.26	-20.33	-20.19	-20.08	-19.52	1	
-13.07	-18.43	-18.78	-19.00	-19.00	-19.00	-19.00	-19.00	-20.12	-21.88	-21.67	-21.46	-20.08	-19.00	-19.00	-19.00	-19.00	-19.00	-19.00	-17.62	-11.51	2	
-12.25	-17.76	-17.79	-18.00	-18.00	-18.00	-18.00	-18.00	-18.00	-19.41	-20.86	-20.26	-19.87	-19.20	-18.00	-18.00	-18.00	-18.00	-18.00	-17.79	-16.38	-11.20	3
-11.48	-17.00	-17.00	-17.00	-17.00	-17.00	-17.00	-17.00	-17.00	-18.21	-19.87	-19.27	-19.13	-18.29	-17.00	-17.00	-17.00	-17.00	-17.00	-17.00	-15.57	-10.81	4
-10.81	-16.00	-16.00	-16.00	-16.00	-16.00	-16.00	-16.00	-16.00	-16.63	-18.43	-17.23	-17.40	-16.91	-16.00	-16.00	-16.00	-16.00	-15.50	-15.60	-14.83	-10.53	5
-10.00	-15.00	-15.00	-15.00	-15.00	-15.00	-15.00	-15.00	-15.00	-15.00	-16.42	-15.00	-15.57	-15.36	-15.00	-15.00	-15.00	-15.00	-14.62	-14.72	-14.23	-10.53	6
-9.33	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-13.70	-13.66	-13.59	-10.42	7
-8.62	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-13.00	-12.61	-12.57	-13.00	-10.28	8
-7.92	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-12.00	-11.16	-11.55	-12.43	-10.03	9
-7.07	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-11.00	-10.14	-10.74	-11.69	-9.50	10
-6.43	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-10.00	-8.94	-10.00	-11.02	-8.83	11
-5.69	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-8.20	-9.33	-10.49	-8.09	12
-4.88	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-8.00	-7.35	-9.01	-9.89	-7.49	13
-4.14	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-7.00	-6.61	-8.62	-9.61	-6.82	14
-3.51	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-6.00	-7.77	-9.36	-6.00	15
-2.73	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-7.10	-8.90	-5.00	16
-2.02	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-3.93	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-6.33	-8.37	-4.00	17
-1.46	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-4.71	-7.39	-3.00	18
-0.83	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-1.92	-3.19	-6.15	-2.00	19
-0.33	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.67	-4.11	-1.00	20
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21
0.41	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.78	1.00	1.93	1.00	22
0.94	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	3.34	2.00	3.94	2.00	23
1.57	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	4.78	3.00	5.28	3.00	24
2.31	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	5.81	4.00	6.19	4.00	25
2.81	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.90	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	6.51	5.14	7.01	5.00	26
3.34	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	5.88	6.00	6.00	6.00	6.00	7.43	6.33	7.60	6.00	27
4.11	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	6.62	8.17	7.29	8.38	7.00	28
4.82	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	7.32	9.40	8.00	9.05	7.53	29
5.45	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	8.06	10.36	8.59	9.47	7.99	30
6.09	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.25	10.00	10.00	10.00	8.95	11.20	9.26	10.00	8.63	31
6.72	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	10.92	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	9.69	12.01	9.90	10.50	8.90	32
7.39	12.00	12.00	12.00	12.00	12.08	12.00	12.00	12.00	12.00	12.65	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	10.29	12.58	10.46	11.34	9.23	33
8.03	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	14.27	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	13.00	11.06	13.21	11.13	12.30	9.37	34
8.70	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	15.36	14.00	14.69	14.00	13.53	14.00	14.00	11.77	14.20	11.84	13.11	9.58	35
9.40	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	16.32	16.32	16.21	15.22	14.38	15.00	14.84	12.61	15.15	12.58	14.02	9.69	36
10.36	15.75	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.49	17.34	17.80	17.87	16.00	15.26	16.00	15.54	13.46	16.14	13.39	15.05	9.83	37
11.13	16.56	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.94	18.54	18.61	19.07	17.00	16.03	17.00	16.28	14.45	17.00	14.62	16.00	10.04	38
11.98	17.23	17.80	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	19.28	19.81	19.63	19.88	18.22	16.85	18.00	17.02	15.96	18.29	16.60	17.06	10.39	39
12.75	17.83	18.54	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	20.13	20.62	20.44	20.48	19.24	18.19	19.00	18.33	17.09	19.00	18.12	18.19	10.74	40
16.49	18.61	19.21	19.81	20.00	20.13	20.06	20.13	20.23	20.80	21.36	21.57	21.22	20.00	19.77	19.70	19.67	19.53	19.60	19.56	19.39	19.14	$i=41$

Tabela 7.24. Visine tačaka radijalnih linija na početku posmatranog intervala z_{ac} [mm]

$i=22$	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	z_{ac} [mm]
0.00	0.23	1.20	2.58	3.77	5.42	6.78	7.93	9.04	9.78	10.15	11.51	12.87	13.45	14.11	15.38	16.46	17.98	18.93	20.33	21.64	23.00	1
0.00	0.52	1.46	2.74	3.89	5.46	6.53	7.85	8.96	9.95	10.40	11.55	12.38	13.16	14.15	15.47	16.54	17.90	18.76	20.12	20.94	23.00	2
0.00	0.81	1.71	2.95	4.02	5.46	6.49	7.85	8.88	10.07	10.73	11.64	12.05	13.12	14.15	15.55	16.54	17.81	18.76	20.00	20.61	23.17	3
0.00	1.05	1.96	3.11	4.14	5.42	6.53	7.85	8.88	10.07	10.90	11.64	12.09	13.24	14.35	15.55	16.62	17.69	18.68	19.87	20.49	23.41	4
0.00	1.26	2.20	3.24	4.35	5.58	6.57	7.85	8.92	10.11	10.90	11.76	12.38	13.43	14.60	15.80	16.70	17.69	18.60	19.67	20.41	24.03	5
0.00	1.30	2.37	3.44	4.51	5.67	6.65	7.89	8.96	10.15	10.98	12.01	12.75	13.90	14.85	15.92	16.83	17.77	18.64	19.63	20.45	24.86	6
0.00	1.34	2.49	3.61	4.64	5.83	6.82	7.97	9.00	10.20	11.14	12.17	13.12	14.20	15.14	16.13	17.03	18.02	18.76	19.58	20.49	26.26	7
0.00	1.46	2.54	3.77	4.80	5.95	6.98	8.05	9.04	10.24	11.14	12.25	13.33	14.40	15.43	16.41	17.28	18.27	19.17	19.91	20.61	27.53	8
0.00	1.46	2.66	3.89	4.92	6.08	7.07	8.18	9.17	10.32	11.27	12.42	13.41	14.60	15.76	16.70	17.57	18.60	19.79	20.41	20.74	28.03	9
0.00	1.46	2.70	4.02	5.05	6.20	7.15	8.30	9.29	10.48	11.35	12.54	13.61	14.81	15.84	17.03	17.94	19.05	20.53	20.99	21.20	28.40	10
0.00	1.46	2.74	4.10	5.13	6.28	7.31	8.42	9.45	10.65	11.47	12.79	13.78	15.01	15.96	17.36	18.39	19.67	21.40	21.81	21.64	28.69	11
0.00	1.42	2.78	4.14	5.20	6.37	7.40	8.59	9.58	10.77	11.64	12.95	13.94	15.26	16.20	17.65	18.88	20.37	22.01	22.80	22.34	28.93	12
0.00	1.46	2.82	4.14	5.29	6.49	7.52	8.71	9.70	10.85	11.80	13.08	14.11	15.51	16.54	18.06	19.34	20.90	22.51	23.37	23.41	29.06	13
0.00	1.46	2.82	4.20	5.34	6.57	7.60	8.84	9.78	10.94	12.01	13.20	14.27	15.59	16.83	18.23	19.63	21.23	22.84	23.79	24.32	29.22	14
0.00	1.51	2.82	4.22	5.38	6.65	7.68	8.92	9.95	11.02	12.05	13.33	14.40	15.67	16.91	18.39	19.83	21.48	23.04	24.24	24.73	29.35	15
0.00	1.51	2.78	4.22	5.42	6.70	7.77	8.96	9.95	11.10	12.13	13.37	14.44	15.71	16.95	18.51	19.96	21.69	23.17	24.44	25.10	29.43	16
0.00	1.51	2.74	4.22	5.38	6.78	7.77	9.00	9.95	11.20	12.13	13.41	14.40	15.80	16.95	18.56	20.00	21.77	23.25	24.65	25.56	29.59	17
0.00	1.51	2.78	4.27	5.38	6.78	7.77	9.04	9.95	11.23	12.20	13.41	14.44	15.76	16.95	18.60	20.00	21.81	23.33	24.98	26.01	29.67	18
0.00	1.51	2.78	4.27	5.38	6.78	7.77	9.08	9.99	11.27	12.20	13.45	14.48	15.80	16.95	18.64	20.00	21.89	23.37	25.10	26.30	29.72	19
0.00	1.51	2.78	4.31	5.38	6.82	7.77	9.08	10.03	11.27	12.20	13.41	14.48	15.84	16.95	18.64	20.00	21.93	23.37	25.23	26.54	29.80	20
0.00	1.51	2.78	4.31	5.38	6.78	7.77	9.08	10.03	11.27	12.20	13.45	14.48	15.92	16.95	18.64	20.00	21.93	23.41	25.27	26.63	29.84	21
0.00	1.51	2.78	4.35	5.38	6.82	7.77	9.12	10.03	11.27	12.20	13.45	14.48	15.88	16.99	18.76	20.00	21.93	23.37	25.27	26.71	29.84	22
0.00	1.51	2.78	4.31	5.38	6.82	7.77	9.04	10.03	11.27	12.20	13.45	14.48	15.92	17.03	18.68	20.08	21.93	23.41	25.20	26.63	29.80	23
0.00	1.51	2.82	4.31	5.42	6.82	7.77	9.04	10.03	11.20	12.20	13.53	14.52	15.92	17.11	18.72	20.12	21.89	23.20	25.20	26.46	29.80	24
0.00	1.55	2.87	4.31	5.42	6.78	7.81	9.08	10.03	11.23	12.20	13.53	14.56	15.92	17.11	18.68	20.04	21.81	23.04	25.10	26.34	29.72	25
0.00	1.55	2.87	4.27	5.42	6.74	7.77	9.00	9.99	11.20	12.13	13.49	14.56	15.92	17.11	18.60	20.00	21.64	22.84	24.90	26.05	29.63	26
0.00	1.55	2.87	4.22	5.38	6.70	7.72	8.92	9.91	11.10	12.13	13.41	14.52	15.84	16.99	18.47	19.75	21.36	22.39	24.61	25.72	29.47	27
0.00	1.55	2.87	4.22	5.34	6.61	7.64	8.84	9.74	10.98	12.01	13.28	14.44	15.63	16.87	18.20	19.50	21.20	21.73	24.20	24.82	29.26	28
0.00	1.51	2.87	4.20	5.25	6.49	7.56	8.75	9.62	10.85	11.93	13.12	14.27	15.47	16.66	17.94	19.13	20.94	20.66	23.58	23.54	29.14	29
0.00	1.51	2.82	4.10	5.17	6.45	7.44	8.63	9.50	10.73	11.76	12.91	14.03	15.20	16.37	17.65	18.60	20.61	19.96	22.80	22.51	29.02	30
0.00	1.51	2.82	4.10	5.13	6.28	7.31	8.47	9.33	10.57	11.60	12.71	13.74	15.01	15.84	17.28	18.20	19.96	19.50	21.89	21.77	28.73	31
0.00	1.51	2.78	3.98	5.09	6.16	7.20	8.30	9.20	10.40	11.35	12.50	13.49	14.77	15.80	16.91	17.77	19.46	19.13	21.15	21.40	28.56	32
0.00	1.51	2.70	3.89	4.92	5.99	7.07	8.14	9.12	10.24	11.10	12.38	13.41	14.60	15.59	16.62	17.36	19.09	19.01	20.70	20.86	28.13	33
0.00	1.51	2.62	3.77	4.80	5.91	6.90	8.05	8.96	10.15	11.02	12.25	13.20	14.40	15.34	16.41	17.07	18.76	18.84	20.33	20.45	27.70	34
0.00	1.42	2.54	3.65	4.59	5.79	6.74	7.93	8.92	10.07	10.85	12.13	12.95	14.23	15.20	16.25	16.91	18.51	18.84	20.04	20.45	24.28	35
0.00	1.38	2.37	3.44	4.43	5.62	6.61	7.85	8.80	9.99	10.77	11.84	12.75	13.94	15.01	16.17	16.87	18.31	18.93	19.87	20.61	23.91	36
0.00	1.26	2.17	3.24	4.22	5.50	6.45	7.72	8.71	9.87	10.73	11.76	12.63	13.90	14.89	16.08	16.87	18.20	19.09	19.83	20.82	23.58	37
0.00	1.09	1.92	3.11	4.02	5.29	6.32	7.68	8.71	9.95	10.77	11.80	12.54	13.82	14.81	16.08	16.95	18.14	19.30	20.00	21.07	23.20	38
0.00	0.85	1.63	2.87	3.89	5.17	6.24	7.60	8.71	9.95	10.94	11.80	12.54	13.70	14.73	16.04	16.99	18.23	19.46	20.74	21.36	23.04	39
0.00	0.60	1.30	2.58	3.77	5.05	6.20	7.60	8.75	9.95	10.77	11.76	12.75	13.74	14.77	16.04	16.99	18.35	19.46	20.74	21.69	23.00	40
0.00	0.15	0.89	2.20	3.52	4.97	6.20	7.60	8.84	9.82	10.81	11.88	13.16	13.82	14.81	16.08	17.07	18.56	19.38	21.20	22.34	23.00	41

7. Zapreminsko deformisanje u otvorenim kalupima

Za kompletnu kinematsku analizu napravljen je program u MATLAB-u (Prilog P.3.) kod koga je dio ulaznih podataka iz deformacione analize obradka, a dio podataka su vrijednosti koordinata deformisanih radijalnih i aksijalnih linija mreže. Ovaj program automatski određuje čvorne tačke deformisane mreže na početku posmatranog intervala, tj presječne tačke deformisanih linija mreže, odnosno tačke čije se pomjeranje određuje. Vrijednosti koordinata presječnih tačaka date su u Tabeli 7.25. i Tabeli 7.26., a programski generisana deformisana mreža na početku posmatranog intervala data je na Slici 7.14.

Tabela 7.25. Radijusi presječnih tačaka na početku posmatranog intervala r_{pa} [mm]

i↓ j→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_z=13$
1	-19.02	-16.04	-12.50	-9.54	-6.44	-3.39	-0.62	2.14	5.04	8.18	10.44	15.30	18.46
2	-19.83	-17.39	-12.98	-9.07	-6.19	-3.24	-0.55	2.14	5.09	7.90	12.31	16.52	19.00
3	-19.99	-17.62	-13.41	-8.94	-6.13	-3.18	-0.51	2.17	5.11	7.86	12.70	16.84	19.14
4	-20.03	-17.83	-13.67	-9.08	-6.12	-3.15	-0.47	2.21	5.22	8.08	13.05	16.99	19.23
5	-20.05	-17.86	-13.81	-9.21	-6.12	-3.15	-0.43	2.28	5.29	8.32	13.15	17.06	19.28
6	-20.09	-17.78	-13.84	-9.39	-6.15	-3.15	-0.35	2.44	5.31	8.83	13.27	17.06	19.37
7	-20.12	-17.76	-13.92	-9.58	-6.28	-3.15	-0.29	2.55	5.54	9.13	13.34	17.06	19.42
8	-20.18	-18.00	-14.04	-10.04	-6.56	-3.26	-0.25	2.74	5.96	9.48	13.45	17.07	19.49
9	-20.55	-18.43	-14.16	-10.29	-6.79	-3.43	-0.22	2.90	6.23	9.75	13.55	17.29	19.55
10	-21.96	-19.02	-14.24	-10.49	-6.90	-3.42	-0.15	3.12	6.50	10.07	13.74	17.86	20.77
11	-22.17	-19.41	-14.30	-10.60	-6.99	-3.38	-0.03	3.27	6.75	10.34	13.98	18.16	21.18
12	-22.00	-18.64	-14.35	-10.64	-6.89	-3.29	0.06	3.48	7.05	10.63	14.36	18.38	21.18
13	-20.42	-18.32	-14.56	-10.77	-7.08	-3.32	0.03	3.50	7.18	10.71	14.42	18.23	20.48
14	-19.99	-18.01	-14.44	-10.85	-7.20	-3.49	-0.01	3.41	7.06	10.74	14.42	17.87	19.95
15	-19.92	-17.84	-14.44	-10.78	-7.18	-3.57	-0.05	3.41	6.94	10.73	14.37	17.76	19.87
16	-19.84	-17.68	-14.27	-10.66	-7.03	-3.43	-0.09	3.25	6.84	10.53	14.18	17.66	19.78
17	-19.75	-17.60	-14.11	-10.52	-6.91	-3.34	-0.11	3.12	6.67	10.27	14.00	17.56	19.70
18	-19.64	-17.46	-13.81	-10.12	-6.66	-3.27	-0.15	2.96	6.40	9.91	13.68	17.33	19.61
19	-19.56	-17.31	-13.50	-9.76	-6.50	-3.21	-0.20	2.83	6.12	9.52	13.21	17.14	19.41
20	-19.21	-17.06	-13.02	-9.54	-6.40	-3.19	-0.30	2.59	5.77	9.02	12.42	16.53	18.94
21	-18.79	-16.38	-12.59	-9.39	-6.29	-3.12	-0.36	2.39	5.56	8.61	11.84	15.69	18.33
$i_z=22$	-17.40	-15.57	-12.29	-9.29	-6.22	-3.10	-0.40	2.31	5.38	8.38	11.59	14.98	16.49

Tabela 7.26. Visine presječnih tačaka na početku posmatranog intervala z_{pa} [mm]

i↓ j→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_z=13$
1	23.00	23.00	23.00	28.37	29.28	29.64	29.82	29.80	29.62	28.93	23.03	23.00	23.00
2	21.57	20.88	20.61	24.96	26.29	26.56	26.62	26.70	26.48	25.38	20.45	21.21	22.13
3	20.30	19.97	19.66	23.45	24.69	25.10	25.26	25.20	24.91	23.70	19.86	20.43	21.07
4	18.89	18.75	18.77	21.30	23.00	23.32	23.39	23.38	23.13	21.81	18.88	19.30	19.43
5	17.97	17.79	18.07	20.22	21.45	21.80	21.93	21.92	21.56	20.42	18.24	18.35	18.54
6	16.48	16.56	17.07	18.69	19.80	20.00	20.00	20.10	19.92	18.69	17.03	16.99	17.05
7	15.39	15.55	16.15	17.48	18.34	18.59	18.64	18.70	18.53	17.60	16.36	16.08	16.06
8	14.12	14.15	15.13	15.96	16.87	16.95	16.95	17.09	17.00	16.17	15.22	14.74	14.80
9	13.31	13.22	14.16	14.95	15.61	15.78	15.90	15.92	15.77	15.06	14.31	13.79	13.77
10	12.66	12.11	13.06	13.70	14.28	14.42	14.48	14.52	14.48	13.72	13.09	12.63	12.91
11	11.53	11.64	12.12	12.64	13.20	13.41	13.45	13.53	13.31	12.63	12.13	11.78	11.84
12	10.35	10.90	11.12	11.39	12.01	12.18	12.20	12.20	12.01	11.44	11.01	10.76	10.80
13	9.88	10.07	10.17	10.52	10.93	11.22	11.27	11.21	10.96	10.45	10.04	9.95	9.88
14	9.02	8.88	8.98	9.31	9.76	9.95	10.03	10.03	9.73	9.23	8.87	8.71	8.82
15	7.92	7.85	7.93	8.33	8.82	9.02	9.08	9.06	8.84	8.35	7.90	7.62	7.60
16	6.74	6.50	6.77	7.20	7.60	7.77	7.77	7.78	7.65	7.25	6.72	6.27	6.20
17	5.43	5.44	5.81	6.24	6.58	6.78	6.79	6.82	6.64	6.25	5.79	5.22	5.00
18	3.81	4.09	4.67	5.12	5.35	5.38	5.38	5.42	5.36	5.13	4.66	3.98	3.62
19	2.62	3.06	3.69	4.11	4.21	4.26	4.31	4.31	4.22	4.10	3.74	3.08	2.39
20	1.30	1.94	2.54	2.76	2.82	2.77	2.78	2.80	2.87	2.82	2.67	2.04	1.05
21	0.34	1.18	1.46	1.44	1.50	1.51	1.51	1.51	1.55	1.51	1.51	1.27	0.31
$i_z=22$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Na osnovu poznatih vrijednosti koordinata presječnih tačaka radijalnih i aksijalnih linija nedeformisane (Tabela 7.8. i Tabla 7.9.) i deformisane mreže na početku posmatranog intervala (Tabela 7.25. i Tabla 7.26.) određuju se pomjeranja tačaka u radijalnom i aksijalnom pravcu. Pri tome, pomjeranja su:

$$\left. \begin{aligned} u_{ra} &= r_{pa} - r_{p0} \\ u_{za} &= z_{pa} - z_{p0} \end{aligned} \right\} \quad (7.3)$$

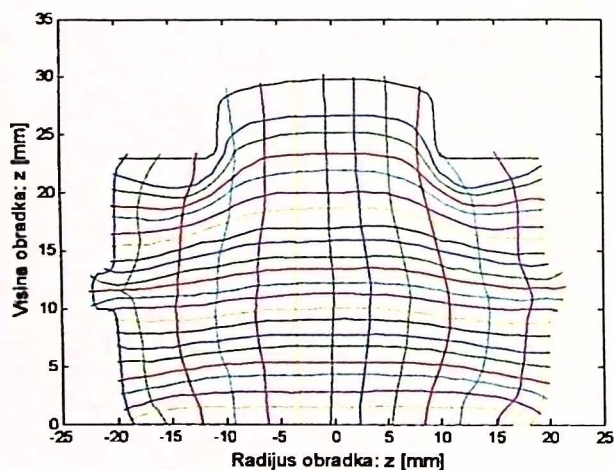
Priraštaj pomjeranja u čvornim tačkama deformisane mreže se određuje kao razlika pomjeranja na kraju i na početku posmatranog intervala:

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_r &= u_{rb} - u_{ra} = r_{pb} - r_{pa} = \Delta r \\ \Delta u_z &= u_{zb} - u_{za} = z_{pb} - z_{pa} = \Delta z \end{aligned} \right\} \quad (7.4)$$

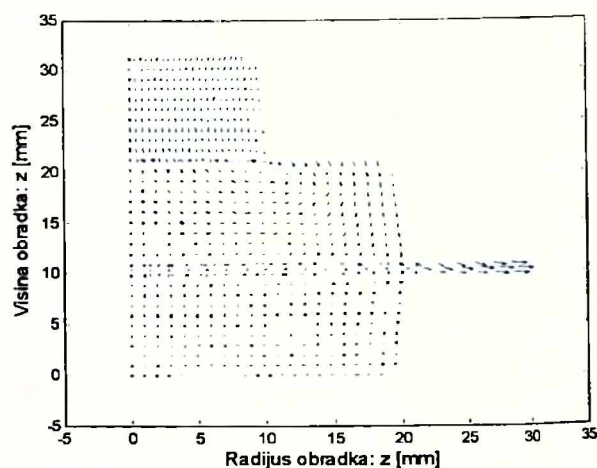
S obzirom da je brzina deformisanja konstantna i iznosi $v=2$ [mm/s] i za usvojeni priraštaj hoda alata $\Delta z=2$ [mm] to je priraštaj vremena:

$$\Delta t = \frac{\Delta z}{v} = 1 \text{ [s]} \quad (7.5)$$

Na osnovu izraza (3.48) moguće je odrediti brzine pomjeranja u čvornim tačkama deformisane mreže. Vrijednosti brzine pomjeranja u ostalim tačkama se aproksimiraju kubnom interpolacijom, pa se praktično dobija neprekidna funkcija brzine pomjeranja u meridijalnoj ravni obradka u funkciji koordinata radijusa i visine. Ilustracije radi, na Slici 7.15 su dati vektori brzine pomjeranja u posmatranim tačkama presjeka. Dijagram vektora brzine pomjeranja je dobijen programski uz pomoć standardne funkcije paketa MATLAB pa nije data apsolutna vrijednost intenziteta vektora, već njihov relativni odnos. Dijagram je pogodan za sagledavanje tečenja materijala u kalupu.



Slika 7.14. Programski generisana deformisana mreža na početku posmatranog intervala



Slika 7.15. Vektori brzina pomjeranja u pojedinim tačkama presjeka

Za poznate brzine pomjeranja tačaka presjeka moguće je odrediti parcijalne izvode brzine pomjeranja po radijusu i visini, na osnovu kojih se dolazi do brzina deformacija (3.34). Vrijednosti parcijalnih izvoda pomjeranja po radijusu i visini u čvornim tačkama deformisane mreže date su u Tabli 7.27. do Tabele 7.30.

Tabela 7.27. Parcijalni izvod brzine radijalnog pomjeranja po radijusu $\partial v_r / \partial r$

$i \backslash j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_r=13$
1	-0.4938	-0.0190	0.2050	0.0262	-0.0012	0.1144	0.0895	0.0601	-0.0178	0.0321	-0.0024	-0.4527	-0.2264
2	-0.2163	0.0310	0.0152	-0.0493	0.0075	0.0986	0.0773	0.0033	-0.0377	-0.1160	-0.1005	-0.0047	0.0734
3	-0.0266	0.0425	0.0056	-0.0834	0.0058	0.0761	0.0537	0.0012	-0.0436	-0.1214	-0.0158	0.0565	0.0467
4	0.0758	0.2553	-0.0012	-0.1509	-0.0027	0.0232	0.0314	-0.0052	-0.1180	-0.1647	0.0128	0.0592	0.0000
5	0.2356	0.3325	0.0017	-0.2062	-0.0700	-0.0017	0.0005	-0.0099	-0.1637	-0.1735	0.0292	0.1381	-0.0001
6	0.2381	0.2970	0.0143	-0.1524	-0.1445	-0.0654	-0.0591	-0.0664	-0.1296	-0.0338	0.0388	0.2130	0.0201
7	0.1689	0.2640	0.0173	-0.0265	-0.1868	-0.1200	-0.1079	-0.0958	-0.1477	-0.0195	0.1604	0.2405	0.0914
8	0.2261	0.2565	0.1136	-0.0085	-0.1905	-0.1915	-0.1756	-0.1561	-0.1527	-0.0069	0.1986	0.0542	0.0000
9	0.1526	0.1852	0.1260	-0.0017	-0.1485	-0.2256	-0.2213	-0.1887	-0.1016	0.0007	0.2327	0.0540	-0.2168
10	2.3388	0.4930	0.1766	0.0025	-0.1551	-0.2117	-0.2282	-0.2009	-0.0164	0.0043	0.2040	1.4198	3.0474
11	4.3130	0.4822	0.1431	0.0051	-0.1370	-0.1954	-0.2010	-0.1831	-0.0074	0.0415	0.2703	1.6805	1.5073
12	3.8139	0.7381	0.1442	-0.0014	-0.0883	-0.1109	-0.1707	-0.1784	-0.0068	0.0543	0.1775	1.3102	3.9812
13	1.2927	0.4876	0.1383	-0.0025	-0.0834	-0.0865	-0.1354	-0.1647	-0.0044	0.0780	0.1718	0.0225	-0.5872
14	-0.1490	-0.0032	0.0977	0.0076	-0.0398	-0.0408	-0.0936	-0.0901	-0.0048	0.0188	0.0750	0.0220	0.0000
15	-0.1560	-0.0051	0.0676	0.0028	-0.0058	-0.0053	-0.0874	-0.0269	-0.0259	-0.0033	0.0324	0.1349	0.1194
16	-0.0776	-0.0030	0.0230	0.0015	-0.0264	-0.0299	-0.0237	0.0000	-0.0008	-0.0270	0.0044	0.1141	0.1636
17	0.0333	0.0012	-0.0074	-0.0070	-0.0159	-0.0025	0.0278	0.0265	0.0014	-0.0171	-0.0037	0.0672	0.1377
18	0.1886	0.0024	-0.0519	-0.0048	0.0001	0.0087	0.0728	0.0624	0.0237	-0.0026	-0.0332	-0.0314	-0.0402
19	0.1978	-0.0003	-0.0685	-0.0058	0.0031	0.0689	0.0845	0.1050	0.0620	0.0016	-0.0348	-0.0344	0.0000
20	0.2077	-0.0083	-0.0098	0.0138	0.0424	0.1057	0.1279	0.1312	0.0441	0.0377	-0.0151	-0.0164	0.1036
21	0.1704	-0.0147	-0.0081	0.0753	0.0702	0.1128	0.1714	0.1174	0.0989	0.1093	-0.0047	-0.0157	0.0000
$i_r=22$	-0.0647	-0.0760	0.0122	0.0918	0.0641	0.1176	0.1605	0.1203	0.1310	0.1108	0.0367	-0.0045	-0.1008

Tabela 7.28. Parcijalni izvod brzine radijalnog pomjeranja po visini $\partial v_r / \partial z$

$i \backslash j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_z=13$
1	0.0064	-0.1647	-0.2939	0.2406	0.0871	0.0806	0.0767	0.0658	0.1492	0.0994	0.8827	0.2016	-0.1754
2	-0.0130	-0.1635	-0.3670	0.0497	0.0485	0.0908	0.1142	0.1472	0.1887	0.1031	0.4492	0.0838	0.0026
3	-0.0093	-0.1766	-0.2945	-0.0174	-0.0061	0.0769	0.1202	0.1608	0.2461	0.1888	0.3624	-0.0049	0.0030
4	0.0311	-0.1627	-0.1333	-0.1789	-0.0702	0.0664	0.1130	0.1554	0.2548	0.3866	0.2704	-0.0076	-0.0326
5	0.0181	-0.0094	0.0101	-0.1995	-0.0324	0.0724	0.1395	0.2245	0.1796	0.3781	0.1532	0.0461	-0.0144
6	0.0174	0.0614	0.1226	-0.1381	-0.0447	0.0053	0.1181	0.2128	0.1780	0.2085	-0.0001	0.0366	-0.0148
7	0.0023	0.0087	0.0701	-0.0832	-0.1518	-0.0333	0.0610	0.1563	0.2325	0.0628	-0.0052	-0.0177	-0.0305
8	-0.0278	-0.0382	0.0713	-0.0003	-0.0956	-0.0629	0.0559	0.1391	0.2207	0.0256	0.0105	-0.2752	-0.0579
9	0.1676	0.0233	0.1453	0.0814	0.0076	0.0051	0.0851	0.1340	0.1640	0.0228	0.0105	-0.3319	-0.7247
10	2.3156	0.1615	0.2569	0.1775	0.1895	0.1606	0.1352	0.1200	0.1114	0.0263	0.0473	-0.7725	-1.2647
11	0.6798	0.2342	0.2946	0.3438	0.3038	0.2158	0.1475	0.1064	0.0949	0.0442	0.0575	-0.0220	-0.0409
12	-0.2600	0.1443	0.1403	0.1762	0.1859	0.1165	0.0113	0.0074	0.0044	-0.0047	-0.0080	0.8980	1.0154
13	-2.3081	-0.0410	0.1052	0.0281	0.0085	-0.0080	-0.0373	-0.1108	-0.1473	-0.1966	-0.1471	0.2542	1.0484
14	-0.3477	-0.1566	0.0107	0.0261	0.0004	-0.0670	-0.0731	-0.1297	-0.3052	-0.1662	-0.1083	0.1607	-0.0836
15	-0.0068	-0.0624	-0.0163	0.0944	0.0395	0.0176	-0.0123	-0.0692	-0.1739	-0.1332	-0.0888	0.0143	-0.0290
16	0.0104	-0.0647	-0.0136	0.0706	0.0304	0.0925	-0.0146	-0.1053	-0.1481	-0.1897	-0.1157	-0.0111	-0.0123
17	0.0238	-0.0917	-0.0026	0.0566	0.0328	0.0012	-0.0793	-0.1639	-0.1970	-0.2409	-0.1984	-0.0925	-0.0001
18	0.0207	-0.0086	0.0420	0.0876	0.0848	-0.0230	-0.0459	-0.1058	-0.2159	-0.2656	-0.3131	-0.0946	-0.0106
19	0.0499	0.0519	0.1231	0.1176	0.0989	0.0026	-0.0305	-0.0832	-0.1562	-0.1434	-0.2628	-0.0855	-0.1343
20	0.1786	0.2000	0.2684	0.1367	0.0596	0.0514	-0.0316	-0.1092	-0.0373	-0.1337	-0.2556	-0.2675	-0.2984
21	0.1477	0.2616	0.2113	0.0138	0.0042	0.0061	-0.0127	-0.0130	-0.0082	-0.1741	-0.1586	-0.4017	-0.3265
$i_r=22$	0.1034	0.3788	0.1116	-0.0894	-0.0182	-0.0597	0.0000	0.0371	0.0000	-0.1156	-0.0042	-0.3166	-0.2195

Tabela 7.29. Parcijalni izvod brzine aksijalnog pomjeranja po radijusu $\partial v_z / \partial r$

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_r=13$
1	0.0000	0.0000	0.1841	0.1539	-0.1951	-0.0844	-0.0040	0.0148	-0.0001	-0.3266	-0.0849	0.0010	0.0000
2	0.0927	0.1953	0.5687	0.0971	-0.0997	-0.0128	-0.0120	-0.0279	-0.0693	-0.5145	-0.4336	-0.3334	-0.3913
3	-0.0002	0.1594	0.6750	0.0854	-0.1105	-0.0696	-0.0338	-0.0343	-0.1120	-0.4140	-0.5536	-0.2863	-0.1587
4	-0.0002	0.1860	0.7504	0.0692	-0.1082	-0.0703	-0.0515	-0.0472	-0.1154	-0.4312	-0.6008	-0.1725	0.0002
5	0.0427	0.2486	0.6926	0.0758	-0.0713	-0.0574	-0.0804	-0.0873	-0.1383	-0.3716	-0.6330	-0.2602	0.0003
6	0.0000	0.0641	0.4756	0.3633	0.0166	-0.0224	-0.0518	-0.1432	-0.2056	-0.3226	-0.4847	-0.2006	0.0002
7	-0.0001	0.0909	0.4082	0.2988	0.0520	-0.0030	-0.0929	-0.1511	-0.2257	-0.2909	-0.4602	-0.2767	-0.0638
8	-0.0319	0.0155	0.2830	0.2421	0.1023	0.0032	-0.0297	-0.1950	-0.1658	-0.1849	-0.3598	-0.3654	-0.2075
9	0.4850	0.2698	0.1927	0.1567	0.1028	-0.0003	-0.1056	-0.1424	-0.1008	-0.1055	-0.2952	-0.2280	-0.0141
10	0.5661	0.2613	0.1181	0.0682	0.0192	-0.0024	-0.0698	-0.0923	-0.0039	-0.0032	-0.1730	-0.1684	-0.0088
11	-0.2798	0.0118	0.0942	-0.0009	-0.0346	-0.0263	-0.0485	-0.0381	0.0050	0.0039	-0.0920	-0.0158	0.2509
12	-0.0899	0.0030	0.0329	-0.0075	-0.0810	-0.0481	-0.0429	-0.0010	0.0518	0.0438	0.0222	-0.0156	-0.2563
13	0.0000	-0.0134	-0.0488	-0.0445	-0.1033	-0.0902	-0.0049	0.0242	0.0780	0.0952	0.0859	0.0033	-0.0813
14	-0.2036	-0.1330	-0.1166	-0.1385	-0.1060	-0.0749	-0.0397	0.0053	0.1298	0.1066	0.1160	0.0112	-0.1012
15	-0.0163	-0.0492	-0.1004	-0.1434	-0.1415	-0.0732	-0.0298	0.0029	0.1141	0.1860	0.1307	0.0052	-0.0665
16	0.2054	0.0046	-0.1091	-0.1467	-0.1107	-0.0375	-0.0319	-0.0023	0.0413	0.1968	0.1817	0.0246	0.0000
17	0.0861	-0.0046	-0.1189	-0.1357	-0.1004	-0.0730	-0.0293	0.0015	0.0882	0.1684	0.1733	0.1216	0.0441
18	-0.0042	-0.0549	-0.1143	-0.1143	-0.0845	-0.0446	-0.0216	0.0014	0.0594	0.1267	0.1703	0.1522	0.1555
19	-0.0738	-0.1076	-0.1416	-0.0670	-0.0546	-0.0052	-0.0030	-0.0013	0.0443	0.1033	0.1680	0.2020	0.2380
20	-0.1728	-0.1307	-0.0995	-0.0368	-0.0141	-0.0125	-0.0193	-0.0008	0.0150	0.0301	0.1068	0.2311	0.4282
21	-0.2468	-0.0882	-0.0348	-0.0011	-0.0009	-0.0170	0.0008	0.0002	-0.0041	0.0033	0.0582	0.1364	0.3946
$i_r=22$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabela 7.30. Parcijalni izvod brzine aksijalnog pomjeranja po visini $\partial v_z / \partial z$

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$j_r=13$
1	0.1539	-0.0284	-0.3538	0.0911	0.0000	-0.0993	-0.2557	-0.1923	-0.1089	0.4903	-0.2423	0.1599	0.6890
2	-0.0297	-0.0700	-0.3547	-0.0069	-0.1240	-0.1522	-0.0892	-0.1000	-0.0003	-0.0493	-0.0447	0.1720	0.0186
3	-0.0577	-0.0491	-0.3041	-0.0848	-0.0780	-0.0913	-0.0411	-0.0153	-0.0002	-0.0317	-0.0752	0.0950	-0.0499
4	0.0085	-0.0349	-0.0079	-0.0049	-0.0304	-0.0685	-0.0462	0.0018	0.0085	0.0047	-0.0302	0.0702	0.0207
5	-0.0402	-0.0764	0.0062	0.2795	0.0048	-0.0054	-0.0546	0.0239	0.1093	0.0180	-0.0508	-0.0227	-0.0136
6	-0.2022	-0.1588	-0.0002	0.1992	0.1376	0.0689	0.0311	0.0785	0.2232	0.2223	0.0118	-0.0243	-0.0162
7	-0.1652	-0.1519	0.0475	0.1226	0.2644	0.1719	0.1894	0.2193	0.2733	0.1177	0.0201	-0.0209	0.0146
8	0.0657	-0.1074	0.0005	0.2953	0.3608	0.3033	0.2621	0.3244	0.2567	0.1100	-0.0307	-0.1058	-0.1170
9	0.1607	-0.0441	0.0003	0.2339	0.3553	0.3948	0.4708	0.3636	0.2666	0.1018	-0.0205	-0.1236	-0.3165
10	-0.1070	0.0069	-0.0003	0.0979	0.2932	0.3930	0.3303	0.3224	0.1758	0.0684	-0.0709	-0.3038	-0.4731
11	-0.3282	-0.0101	0.0014	0.0718	0.2294	0.2924	0.2736	0.2410	0.1146	0.0554	-0.0579	-0.3769	-0.3180
12	-0.1703	-0.3089	0.0042	0.0836	0.0956	0.1921	0.2514	0.1363	0.0632	0.0302	-0.1005	-0.3483	-0.2742
13	-0.3779	-0.2539	-0.0638	0.0438	0.0796	0.0944	0.1000	0.1150	0.0364	-0.0068	-0.0605	-0.2052	-0.2948
14	-0.0188	-0.0130	-0.0731	-0.0069	0.0158	0.0729	0.0469	0.0575	0.0552	-0.0069	-0.0809	-0.0902	-0.1018
15	0.2372	0.0076	-0.0096	-0.0034	-0.0012	0.0008	-0.0152	-0.0089	0.0746	0.0397	-0.0287	-0.0692	-0.0900
16	0.0065	0.0053	0.0042	0.0460	-0.0009	-0.0196	-0.0047	-0.0085	-0.0024	-0.0073	0.0257	-0.0675	-0.1522
17	-0.0893	0.0171	0.0486	0.0021	-0.0038	-0.0173	0.0004	-0.0121	-0.0769	0.0006	0.0123	0.0102	-0.0147
18	-0.0841	-0.0003	0.0447	0.0184	-0.0323	-0.0478	-0.1134	-0.0985	-0.0714	0.0079	0.0122	0.0096	-0.0249
19	-0.0084	0.0085	0.0484	0.0112	-0.0596	-0.0732	-0.1263	-0.1081	-0.0796	-0.0250	0.0755	0.0160	-0.0159
20	0.0447	0.1310	0.0062	-0.0568	-0.1042	-0.1737	-0.1539	-0.1961	-0.1533	-0.0501	0.0046	0.1277	0.0248
21	0.1159	0.0163	-0.0162	-0.1569	-0.1857	-0.1860	-0.1981	-0.2313	-0.2112	-0.1896	-0.1108	0.0109	0.2363
$i_r=22$	0.3020	-0.1057	-0.2015	-0.2184	-0.1736	-0.2430	-0.2778	-0.2004	-0.2687	-0.2937	-0.1807	0.0000	0.5248

Korišćenjem kubne interpolacije funkcija promjena brzina pomjeranja, dolazi se do vrijednosti brzina pomjeranja u usvojenim tačkama meridijalnog presjeka, čije su koordinate date u Tabeli 7.14. i Tabeli 7.15., a raspored na Slici 7.6., a samim tim i do promjene parcijalnih

izvoda u radijalnom i aksijalnom pravcu. Na taj način se dolazi do radijalne, aksijalne i ugaone komponente brzine deformacije.

Analogno sa određivanjem obodne komponente deformacije, obodna komponenta brzine deformacije se ne određuje preko parcijalnih izvoda pomjeranja, već kao količnik radijalne brzine pomjeranja i radijusa (3.29). Efektivna brzina deformacije je dobijena na osnovu izraza (3.30). Vrijednosti normalnih komponenata brzina deformacije, smičuće i efektivne brzine deformacije u posmatranim tačkama meridijalnog presjeka obradka date su u Tabeli 7.31 do Tabele 7.35., a trodimenzionalni dijagrami promjene navedenih kinematskih parametara u funkciji radijusa i visine obradka na Slici 7.16 do Slike 7.20. Sve ovo se dobija uz pomoć navedenog programa Program P.3.2.

Tabela 7.31. Radijalna brzina deformacije: $\dot{\epsilon}_r$ [s^{-1}]

$\frac{r}{R}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.096	0.095	0.095	0.095	0.093	0.092	0.087	0.077	0.063	0.048	0.032	0.016	0.001	-0.010	-0.017	-0.020	-0.020	-0.017	-0.010	-0.002	0.008
2	0.088	0.088	0.088	0.084	0.080	0.074	0.062	0.051	0.039	0.027	0.015	0.003	-0.008	-0.011	-0.014	-0.013	-0.006	0.001	0.009	0.023	0.036
3	0.081	0.081	0.079	0.073	0.068	0.061	0.051	0.041	0.031	0.021	0.011	0.001	-0.007	-0.012	-0.017	-0.013	-0.009	-0.005	0.004	0.021	0.038
4	0.070	0.070	0.066	0.060	0.054	0.047	0.039	0.031	0.023	0.014	0.006	-0.003	-0.011	-0.018	-0.023	-0.021	-0.017	-0.013	-0.001	0.021	0.046
5	0.049	0.049	0.045	0.040	0.035	0.031	0.027	0.021	0.014	0.007	0.000	-0.007	-0.015	-0.023	-0.025	-0.025	-0.024	-0.024	-0.019	-0.005	0.046
6	0.039	0.038	0.032	0.025	0.018	0.012	0.007	0.002	-0.004	-0.010	-0.017	-0.023	-0.031	-0.036	-0.035	-0.034	-0.034	-0.033	-0.026	-0.014	0.045
7	0.027	0.025	0.016	0.006	-0.003	-0.012	-0.018	-0.027	-0.039	-0.050	-0.059	-0.064	-0.069	-0.064	-0.057	-0.051	-0.046	-0.040	-0.035	-0.024	0.050
8	0.006	0.003	-0.006	-0.015	-0.025	-0.034	-0.043	-0.055	-0.068	-0.080	-0.093	-0.104	-0.107	-0.096	-0.085	-0.073	-0.059	-0.046	-0.040	-0.028	0.064
9	-0.026	-0.030	-0.035	-0.041	-0.047	-0.053	-0.063	-0.078	-0.094	-0.109	-0.125	-0.139	-0.135	-0.122	-0.110	-0.097	-0.084	-0.058	-0.043	-0.033	0.078
10	-0.063	-0.064	-0.065	-0.066	-0.068	-0.070	-0.081	-0.096	-0.111	-0.125	-0.140	-0.150	-0.143	-0.137	-0.130	-0.123	-0.099	-0.065	-0.049	-0.047	0.054
11	-0.092	-0.092	-0.092	-0.092	-0.092	-0.096	-0.107	-0.119	-0.130	-0.141	-0.151	-0.146	-0.138	-0.129	-0.119	-0.090	-0.051	-0.045	-0.053	0.000	0.095
12	-0.092	-0.092	-0.092	-0.096	-0.115	-0.134	-0.150	-0.141	-0.126	-0.091	-0.046	-0.044	0.091	0.137	0.123	0.042	-0.068	-0.178	-0.247	-0.202	-0.158
13	-0.124	-0.122	-0.120	-0.120	-0.128	-0.137	-0.155	-0.178	-0.170	-0.066	-0.037	-0.060	0.031	-0.019	-0.035	-0.063	-0.090	-0.118	-0.102	-0.076	-0.050
14	-0.161	-0.157	-0.153	-0.146	-0.136	-0.126	-0.130	-0.162	-0.193	-0.110	-0.027	-0.023	-0.061	-0.059	-0.044	-0.040	-0.036	-0.033	-0.025	-0.021	-0.017
15	-0.191	-0.186	-0.180	-0.168	-0.148	-0.127	-0.135	-0.165	-0.194	-0.145	-0.059	0.023	0.015	-0.004	-0.012	0.003	0.025	0.048	0.051	0.024	-0.003
16	-0.215	-0.207	-0.199	-0.185	-0.162	-0.138	-0.133	-0.149	-0.177	-0.146	-0.050	0.041	0.082	0.099	0.094	0.100	0.116	0.131	0.112	0.059	0.006
17	-0.217	-0.209	-0.199	-0.187	-0.169	-0.150	-0.135	-0.125	-0.125	-0.111	-0.054	0.029	0.110	0.155	0.153	0.154	0.165	0.178	0.159	0.113	0.066
18	-0.217	-0.206	-0.192	-0.178	-0.168	-0.158	-0.139	-0.108	-0.077	-0.046	0.002	0.057	0.117	0.159	0.167	0.175	0.178	0.180	0.165	0.126	0.088
19	-0.209	-0.200	-0.189	-0.178	-0.169	-0.160	-0.141	-0.105	-0.068	-0.023	0.028	0.079	0.124	0.163	0.180	0.195	0.192	0.191	0.169	0.131	0.093
20	-0.180	-0.178	-0.174	-0.173	-0.164	-0.154	-0.129	-0.091	-0.051	-0.011	0.025	0.067	0.114	0.158	0.170	0.174	0.176	0.189	0.188	0.163	0.128
21	-0.163	-0.160	-0.157	-0.152	-0.142	-0.130	-0.106	-0.071	-0.037	-0.003	0.032	0.070	0.106	0.142	0.191	0.204	0.199	0.182	0.159	0.074	-0.032
22	-0.143	-0.141	-0.138	-0.129	-0.115	-0.101	-0.079	-0.051	-0.020	0.011	0.041	0.077	0.113	0.167	0.245	0.333	0.416	0.498	0.577	0.419	0.125
23	-0.143	-0.140	-0.133	-0.114	-0.095	-0.059	-0.017	0.024	0.069	0.119	0.200	0.318	0.431	0.541	0.456	0.092	0.362	0.640	0.908	1.154	1.129
24	-0.132	-0.129	-0.121	-0.100	-0.080	-0.047	0.011	0.020	0.063	0.109	0.181	0.281	0.382	0.484	0.590	0.687	0.741	0.808	0.876	0.963	1.062
25	-0.118	-0.117	-0.111	-0.090	-0.071	-0.044	0.012	0.018	0.055	0.099	0.130	0.162	0.195	0.223	-0.056	-0.214	0.260	0.588	0.848	1.108	1.368
26	-0.118	-0.117	-0.116	-0.106	-0.091	-0.077	-0.060	-0.039	-0.015	0.009	0.028	0.060	0.092	0.121	0.139	0.164	0.189	0.210	0.217	-0.060	-0.328
27	-0.082	-0.081	-0.080	-0.078	-0.070	-0.063	-0.055	-0.043	-0.027	-0.009	0.010	0.034	0.059	0.083	0.100	0.088	0.062	0.036	0.010	-0.043	-0.119
28	-0.072	-0.066	-0.056	-0.047	-0.041	-0.036	-0.031	-0.026	-0.021	-0.015	-0.009	0.005	0.024	0.044	0.062	0.067	0.060	0.053	0.043	0.004	-0.038
29	-0.034	-0.031	-0.027	-0.023	-0.022	-0.020	-0.019	-0.018	-0.016	-0.014	-0.011	-0.007	0.009	0.020	0.031	0.037	0.035	0.033	0.031	0.037	0.043
30	0.010	0.008	0.005	0.002	-0.002	-0.006	-0.009	-0.013	-0.015	-0.016	-0.017	-0.014	-0.009	-0.005	-0.001	0.011	0.024	0.036	0.048	0.060	0.071
31	0.046	0.041	0.036	0.030	0.024	0.018	0.011	0.004	-0.001	-0.007	-0.013	-0.018	-0.022	-0.027	-0.031	-0.019	-0.003	0.014	0.031	0.050	0.070
32	0.068	0.066	0.063	0.060	0.053	0.046	0.038	0.030	0.020	0.011	0.001	-0.012	-0.027	-0.043	-0.059	-0.046	-0.030	-0.014	0.007	0.038	0.068
33	0.088	0.089	0.090	0.091	0.083	0.071	0.060	0.048	0.037	0.027	0.017	0.001	-0.017	-0.036	-0.054	-0.042	-0.030	-0.017	0.006	0.054	0.102
34	0.124	0.124	0.123	0.122	0.110	0.092	0.074	0.057	0.052	0.047	0.042	0.031	0.016	0.000	-0.015	-0.010	-0.006	-0.002	0.018	0.063	0.109
35	0.155	0.151	0.145	0.139	0.128	0.112	0.096	0.083	0.085	0.087	0.090	0.076	0.054	0.032	0.009	-0.012	-0.033	-0.054	-0.041	0.006	0.069
36	0.153	0.147	0.135	0.125	0.119	0.110	0.100	0.093	0.095	0.102	0.110	0.112	0.094	0.060	0.027	0.010	-0.001	-0.010	-0.014	0.000	0.035

Tabela 7.32. Aksijalna brzina deformacije: $\dot{\epsilon}_z$ [s^{-1}]

$\frac{r}{R}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.041	0.042	0.045	0.043	0.025	-0.011	-0.058	-0.105	-0.148	-0.178	-0.194	-0.195	-0.184	-0.163	-0.136	-0.110	-0.088	-0.075	-0.066	-0.059	-0.054
2	-0.009	-0.009	-0.008	-0.005	-0.002	-0.022	-0.073	-0.124	-0.175	-0.172	-0.159	-0.146	-0.131	-0.107	-0.083	-0.068	-0.064	-0.060	-0.057	-0.057	-0.057
3	-0.024	-0.024	-0.022	-0.017	-0.012	-0.028	-0.077	-0.126	-0.165	-0.153	-0.141	-0.129	-0.114	-0.088	-0.062	-0.057	-0.053	-0.049	-0.049	-0.055	-0.061
4	-0.035	-0.035	-0.031	-0.025	-0.018	-0.030	-0.077	-0.123	-0.138	-0.127	-0.116	-0.106	-0.089	-0.064	-0.046	-0.042	-0.039	-0.035	-0.039	-0.052	-0.074
5	-0.028	-0.028	-0.028	-0.028	-0.028	-0.040	-0.089	-0.117	-0.112	-0.105	-0.098	-0.082	-0.063	-0.038	-0.030	-0.025	-0.021	-0.017	-0.016	-0.023	-0.081
6	-0.023	-0.023	-0.017	-0.010	-0.004	-0.007	-0.047	-0.076	-0.065	-0.055	-0.045	-0.035	-0.014	0.002	0.002	0.001	0.002	0.003	0.000	-0.012	-0.086
7	-0.015	-0.014	-0.005	0.003	0.011	0.015	-0.018	-0.025	-0.005	0.015	0.032	0.045	0.068	0.063	0.054	0.045	0.036	0.026	0.018	0.010	-0.092
8	0.015	0.021	0.033	0.040	0.045	0.042	0.016	0.030	0.053	0.075	0.098	0.121	0.134	0.120	0.107	0.092	0.074	0.054	0.038	0.023	-0.108
9	0.057	0.060	0.064	0.068	0.072	0.076	0.066	0.088	0.111	0.133	0.156	0.179	0.180	0.168	0.157	0.145	0.132	0.095	0.063	0.037	-0.122
10	0.123	0.121	0.119	0.118	0.119	0.119	0.125	0.142	0.158	0.175	0.192	0.207	0.205	0.204	0.202	0.201	0.173	0.124	0.091	0.067	-0.071

Tabela 7.32. Aksijalna brzina deformacije: $\dot{\epsilon}_z [s^{-1}]$ (nastavak)

$i \rightarrow$ $j \downarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
11	0.181	0.179	0.178	0.176	0.175	0.176	0.187	0.199	0.210	0.221	0.234	0.236	0.232	0.228	0.222	0.183	0.121	0.098	0.085	-0.007	-0.150
12	0.181	0.178	0.176	0.176	0.195	0.214	0.233	0.233	0.226	0.184	0.104	0.065	-0.145	-0.240	-0.237	-0.145	-0.011	0.123	0.213	0.184	0.155
13	0.245	0.240	0.236	0.231	0.235	0.241	0.265	0.303	0.301	0.172	0.110	0.102	0.029	-0.014	-0.008	0.026	0.060	0.094	0.082	0.065	0.047
14	0.318	0.312	0.305	0.294	0.277	0.260	0.265	0.303	0.341	0.244	0.138	0.108	0.122	0.083	0.048	0.041	0.033	0.026	0.017	0.015	0.013
15	0.378	0.369	0.360	0.344	0.317	0.291	0.298	0.327	0.355	0.300	0.196	0.098	0.089	0.082	0.067	0.036	0.000	-0.036	-0.048	-0.023	0.002
16	0.426	0.414	0.401	0.385	0.354	0.324	0.309	0.318	0.341	0.304	0.198	0.092	0.029	-0.007	-0.020	-0.046	-0.079	-0.112	-0.105	-0.057	-0.008
17	0.432	0.424	0.414	0.400	0.374	0.347	0.323	0.302	0.292	0.269	0.201	0.102	0.001	-0.066	-0.084	-0.107	-0.133	-0.159	-0.151	-0.110	0.070
18	0.435	0.423	0.410	0.392	0.372	0.353	0.324	0.281	0.237	0.194	0.132	0.062	-0.013	-0.075	-0.105	-0.135	-0.151	-0.163	-0.157	-0.125	-0.093
19	0.424	0.413	0.399	0.377	0.362	0.347	0.321	0.273	0.225	0.166	0.098	0.032	-0.026	-0.077	-0.110	-0.148	-0.165	-0.175	-0.161	-0.130	-0.099
20	0.384	0.383	0.376	0.354	0.337	0.321	0.291	0.244	0.192	0.140	0.092	0.036	-0.025	-0.083	-0.105	-0.122	-0.139	-0.167	-0.178	-0.161	-0.135
21	0.355	0.351	0.346	0.317	0.289	0.268	0.236	0.193	0.149	0.105	0.064	0.015	-0.031	-0.078	-0.142	-0.177	-0.173	-0.164	-0.162	-0.159	-0.158
22	0.322	0.320	0.315	0.276	0.244	0.222	0.191	0.154	0.113	0.074	0.038	-0.008	-0.055	-0.127	-0.225	-0.330	-0.425	-0.516	-0.606	-0.655	-0.658
23	0.322	0.318	0.295	0.243	0.212	0.164	0.110	0.060	0.002	-0.062	-0.171	-0.313	-0.441	-0.564	-0.692	-0.827	-0.899	-0.990	-1.083	-1.202	-1.337
24	0.299	0.295	0.271	0.219	0.190	0.147	0.098	0.057	0.002	-0.059	-0.156	-0.288	-0.419	-0.553	-0.695	-0.827	-0.899	-0.990	-1.083	-1.202	-1.337
25	0.266	0.267	0.255	0.204	0.174	0.135	0.090	0.051	0.005	-0.051	-0.098	-0.148	-0.200	-0.248	-0.335	-0.436	-0.552	-0.686	-0.837	-1.004	-1.186
26	0.266	0.267	0.268	0.238	0.206	0.183	0.158	0.128	0.094	0.062	0.040	-0.001	-0.043	-0.081	-0.113	-0.151	-0.190	-0.234	-0.282	-0.333	-0.386
27	0.177	0.177	0.177	0.174	0.155	0.142	0.129	0.111	0.090	0.068	0.045	0.018	-0.015	-0.048	-0.076	-0.075	-0.056	-0.038	-0.019	0.035	0.115
28	0.153	0.146	0.137	0.128	0.109	0.093	0.078	0.066	0.060	0.054	0.048	0.032	0.007	-0.019	-0.043	-0.055	-0.052	-0.050	-0.046	-0.006	0.037
29	0.079	0.076	0.071	0.066	0.053	0.047	0.042	0.039	0.037	0.035	0.032	0.023	0.009	-0.004	-0.018	-0.027	-0.029	-0.030	-0.031	-0.039	-0.046
30	-0.011	-0.009	-0.005	-0.002	-0.004	0.002	0.008	0.016	0.018	0.019	0.020	0.018	0.015	0.012	0.009	0.005	-0.019	-0.034	-0.048	-0.062	-0.076
31	-0.088	-0.084	-0.078	-0.072	-0.064	-0.053	-0.041	-0.029	-0.022	-0.015	-0.008	0.000	0.008	0.016	0.025	0.014	0.000	-0.015	-0.031	-0.053	-0.075
32	-0.138	-0.135	-0.132	-0.129	-0.120	-0.110	-0.099	-0.089	-0.075	-0.061	-0.047	-0.030	-0.010	0.010	0.030	0.024	0.014	0.005	-0.012	-0.043	-0.075
33	-0.181	-0.181	-0.181	-0.181	-0.172	-0.160	-0.148	-0.137	-0.120	-0.102	-0.085	-0.064	-0.039	-0.015	0.009	0.024	0.014	0.005	-0.015	-0.065	-0.114
34	-0.256	-0.255	-0.254	-0.253	-0.234	-0.212	-0.189	-0.167	-0.154	-0.142	-0.129	-0.114	-0.096	-0.078	-0.060	-0.051	-0.041	-0.032	-0.042	-0.087	-0.134
35	-0.323	-0.319	-0.313	-0.307	-0.280	-0.251	-0.222	-0.199	-0.198	-0.197	-0.197	-0.181	-0.158	-0.135	-0.110	-0.077	-0.043	-0.009	-0.014	-0.057	-0.116
36	-0.317	-0.314	-0.304	-0.289	-0.272	-0.247	-0.223	-0.212	-0.213	-0.219	-0.225	-0.227	-0.210	-0.179	-0.146	-0.122	-0.100	-0.081	-0.071	-0.081	-0.104

Tabela 7.33. Obodna brzina deformacije: $\dot{\epsilon}_\theta [s^{-1}]$

$i \rightarrow$ $j \downarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-0.137	-0.138	-0.140	-0.138	-0.117	-0.079	-0.025	0.034	0.090	0.136	0.166	0.183	0.185	0.174	0.151	0.127	0.105	0.088	0.073	0.058	0.044
2	-0.078	-0.078	-0.078	-0.078	-0.078	-0.051	0.011	0.073	0.136	0.144	0.144	0.143	0.139	0.118	0.097	0.081	0.070	0.059	0.048	0.034	0.020
3	-0.056	-0.056	-0.056	-0.056	-0.056	-0.034	0.025	0.084	0.133	0.131	0.129	0.127	0.121	0.100	0.080	0.071	0.063	0.055	0.046	0.033	0.021
4	-0.035	-0.035	-0.035	-0.035	-0.035	-0.017	0.038	0.093	0.115	0.113	0.111	0.109	0.100	0.082	0.069	0.063	0.056	0.049	0.040	0.030	0.026
5	-0.021	-0.021	-0.016	-0.011	-0.005	0.011	0.065	0.095	0.096	0.096	0.095	0.089	0.077	0.061	0.053	0.048	0.043	0.038	0.033	0.026	0.033
6	-0.015	-0.015	-0.015	-0.014	-0.014	-0.004	0.041	0.075	0.070	0.066	0.062	0.057	0.045	0.034	0.032	0.031	0.030	0.029	0.025	0.026	0.040
7	-0.011	-0.011	-0.010	-0.009	-0.008	-0.003	0.037	0.053	0.045	0.037	0.029	0.020	0.003	0.002	0.004	0.007	0.011	0.014	0.016	0.015	0.042
8	-0.021	-0.023	-0.027	-0.024	-0.019	-0.007	0.027	0.025	0.016	0.006	-0.004	-0.014	-0.026	-0.027	-0.027	-0.027	-0.019	-0.010	0.002	0.007	0.044
9	-0.031	-0.029	-0.027	-0.025	-0.022	-0.020	0.001	-0.008	-0.016	-0.023	-0.031	-0.040	-0.046	-0.047	-0.048	-0.049	-0.049	-0.038	-0.021	-0.003	0.044
10	-0.061	-0.057	-0.053	-0.051	-0.050	-0.050	-0.045	-0.048	-0.050	-0.052	-0.054	-0.060	-0.066	-0.073	-0.079	-0.086	-0.078	-0.060	-0.042	-0.021	0.020
11	-0.088	-0.087	-0.086	-0.085	-0.084	-0.081	-0.080	-0.080	-0.079	-0.078	-0.081	-0.087	-0.093	-0.099	-0.102	-0.092	-0.069	-0.053	-0.031	0.013	0.058
12	-0.088	-0.086	-0.084	-0.081	-0.080	-0.079	-0.081	-0.091	-0.100	-0.093	-0.059	-0.018	0.056	0.105	0.116	0.103	0.079	0.054	0.034	0.018	0.003
13	-0.120	-0.118	-0.116	-0.111	-0.106	-0.104	-0.110	-0.124	-0.130	-0.099	-0.072	-0.041	0.008	0.037	0.046	0.038	0.030	0.022	0.017	0.010	0.003
14	-0.157	-0.154	-0.152	-0.148	-0.142	-0.136	-0.135	-0.142	-0.148	-0.126	-0.102	-0.084	-0.061	-0.023	-0.002	0.001	0.004	0.007	0.008	0.006	0.003
15	-0.187	-0.183	-0.180	-0.176	-0.170	-0.165	-0.162	-0.161	-0.160	-0.149	-0.128	-0.108	-0.100	-0.079	-0.057	-0.040	-0.026	-0.012	-0.003	-0.001	0.001
16	-0.211	-0.207	-0.203	-0.200	-0.192	-0.185	-0.177	-0.170	-0.165	-0.155	-0.139	-0.124	-0.108	-0.094	-0.079	-0.059	-0.039	-0.020	-0.007	-0.002	0.002
17	-0.215	-0.214	-0.214	-0.213	-0.205	-0.198	-0.189	-0.178	-0.166	-0.155	-0.140	-0.124	-0.108	-0.094	-0.077	-0.057	-0.039	-0.022	-0.008	-0.002	0.004
18	-0.218	-0.216	-0.215	-0.211	-0.203	-0.196	-0.186	-0.174	-0.162	-0.150	-0.137	-0.122	-0.105	-0.087	-0.070	-0.052	-0.036	-0.020	-0.008	-0.001	0.005
19	-0.215	-0.213	-0.211	-0.200	-0.193	-0.187	-0.179	-0.168	-0.157	-0.144	-0.129	-0.115	-0.100	-0.085	-0.067	-0.051	-0.034	-0.018	-0.008	-0.001	0.006
20	-0.204	-0.206	-0.202	-0.181	-0.172	-0.167	-0.161	-0.152	-0.140	-0.129	-0.117	-0.103	-0.089	-0.074	-0.058	-0.042	-0.027	-0.016	-0.007	0.001	0.007
21	-0.193	-0.192	-0.190	-0.166	-0.148	-0.139	-0.131	-0.123	-0.113	-0.103	-0.098	-0.086	-0.075	-0.063	-0.049	-0.034	-0.017	0.000	0.004	0.001	0.005
22	-0.179	-0.178	-0.178	-0.149	-0.130	-0.120	-0.112	-0.102	-0.093	-0.085	-0.079	-0.068	-0.057	-0.041	-0.024	-0.009	0.004	0.015	0.028	0.038	0.033
23	-0.179	-0.178	-0.164	-0.129	-0.117	-0.105	-0.092	-0.083	-0.071	-0.056	-0.032	-0.011	0.006	0.022	0.038	0.034	0.082	0.131	0.180	0.228	0.270
24	-0.167	-0.166	-0.151	-0.119	-0.108	-0.099	-0.086	-0.077	-0.065	-0.051	-0.027	0.003	0.034	0.064	0.099	0.133	0.158	0.189	0.220	0.247	0.272
25	-0.148	-0.150	-0.142	-0.113	-0.103	-0.092	-0.080	-0.071	-0.061	-0.048	-0.032	-0.013	0.007	0.028	0.023	0.030	0.091	0.143	0.190	0.237	0.284
26	-0.148	-0.149	-0.151	-0.130	-0.113	-0.106	-0.099	-0.090	-0.081	-0.072	-0.069	-0.060	-0.050	-0.040	-0.026	-0.012	0.003	0.018	0.032	0.023	0.015
27	-0.094	-0.095	-0.097	-0.096	-0.084	-0.075	-0.074	-0.068	-0.063	-0.059	-0.054	-0.051	-0.043	-0.034	-0.024	-0.013	-0.005	0.002	0.010	0.007	0.002
28	-0.080	-0.081	-0.081	-0.081	-0.068	-0.057	-0.048	-0.041	-0.040	-0.040	-0.039	-0.037	-0.031	-0.025	-0.019	-0.013	-0.007	0.002	0.002	0.003	0.003
29	-0.044	-0.044	-0.044	-0.043	-0.031	-0.027	-0.023	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.018	-0.016	-0.013	-0.009	-0.006	-0.003	0.001	0.002	0.004
30	0.001	0.001	0.001	0.000	0.007	0.004	0.001	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.004	-0.006	-0.007	-0.008	-0.006	-0.005	-0.003	-0.001	0.002	0.005
31	0.043	0.042	0.042	0.042	0.040	0.035	0.030	0.025	0.024	0.022	0.020	0.017	0.014	0.010	0.008	0.004	0.003	0.001	0.000	0.003	0.005
32	0.069	0.069	0.069	0.069	0.066	0.064	0.062	0.059	0.055	0.051	0.046	0.041	0.036	0.031	0.026	0.021	0.015	0.009	0.004	0.005	0.007
33	0.092	0.092	0.091	0.090	0.088	0.085	0.089	0.090	0.083	0.076	0.069	0.063	0.058	0.053	0.048	0.038	0.027	0.017	0.010	0.011	0.012
34	0.132	0.131	0.131	0.131	0.124	0.119	0.114	0.109	0.102	0.094	0.086	0.083	0.080	0.078	0.075	0.062	0.048	0.034	0.025	0.025	0.025
35	0.168	0.168	0.168	0.168	0.152	0.139	0.126	0.116	0.113	0.110	0.107	0.105	0.104	0.103	0.101	0.089	0.076	0.063	0.055	0.051	0.049
36	0.165	0.166	0.165	0.162	0.154	0.140	0.125	0.119	0.119	0.117	0.116	0.115	0.115	0.116	0.115	0.113	0.106	0.096	0.087	0.078	0.070

Tabela 7.34. Smičuća brzina deformacije: $\dot{\gamma}_r [s^{-1}]$

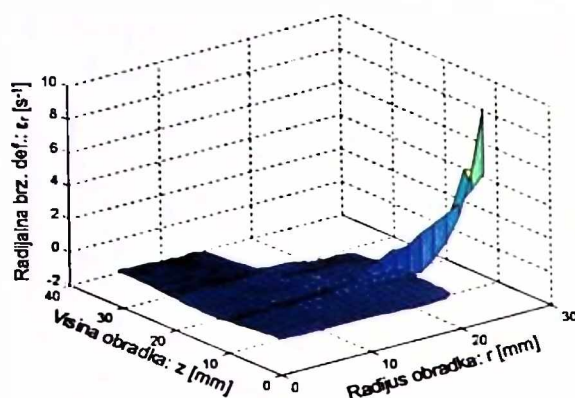
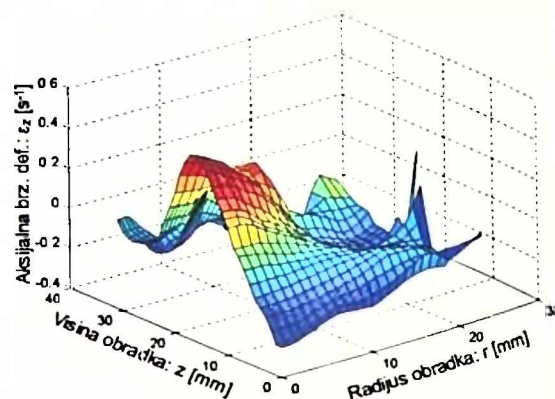
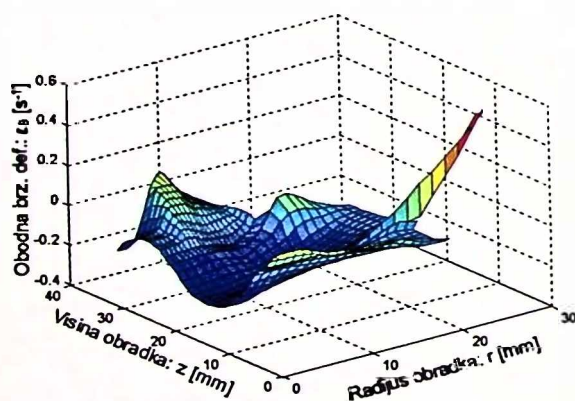
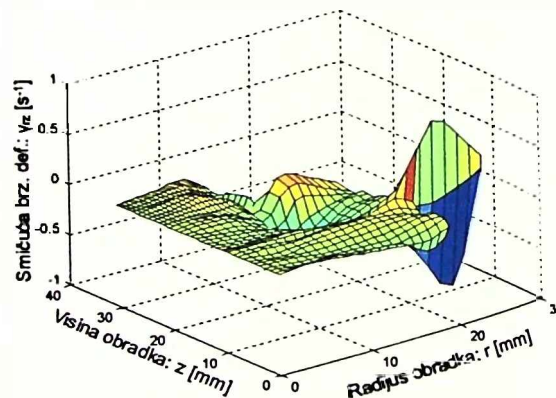
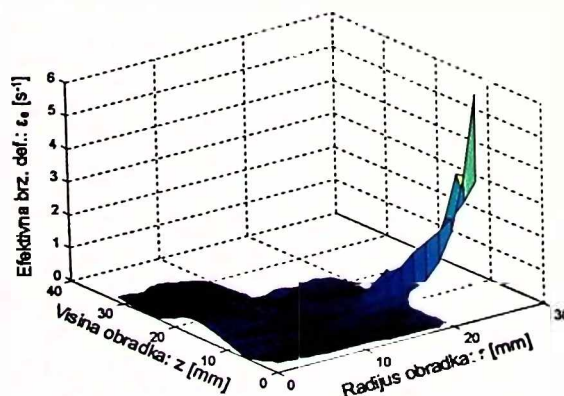
$\frac{r}{R}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.000	0.005	0.010	0.014	0.018	0.021	0.024	0.027	0.031	0.034	0.039	0.045	0.053	0.061	0.069	0.076	0.081	0.082	0.074	0.058	0.036
2	0.000	0.002	0.003	0.006	0.008	0.012	0.018	0.023	0.028	0.034	0.040	0.046	0.051	0.053	0.055	0.048	0.031	0.013	-0.003	-0.015	-0.028
3	0.000	0.001	0.002	0.005	0.007	0.011	0.017	0.023	0.029	0.033	0.037	0.041	0.043	0.043	0.042	0.023	0.003	-0.018	-0.036	-0.050	-0.064
4	0.000	0.003	0.005	0.008	0.011	0.015	0.021	0.027	0.031	0.034	0.037	0.040	0.041	0.040	0.034	0.011	-0.013	-0.037	-0.058	-0.074	-0.057
5	0.000	0.004	0.007	0.010	0.014	0.019	0.024	0.030	0.035	0.039	0.043	0.046	0.047	0.045	0.038	0.016	-0.011	-0.040	-0.076	-0.102	-0.037
6	0.000	0.006	0.011	0.015	0.019	0.024	0.032	0.040	0.048	0.056	0.064	0.072	0.072	0.066	0.052	0.038	0.002	-0.038	-0.085	-0.086	-0.010
7	0.000	0.005	0.008	0.012	0.016	0.020	0.030	0.039	0.049	0.060	0.069	0.079	0.080	0.066	0.049	0.029	0.009	0.013	-0.064	-0.104	-0.001
8	0.000	0.005	0.009	0.014	0.019	0.024	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.054	0.055	0.054	0.053	0.050	0.030	0.001	-0.045	-0.085	0.012
9	0.000	0.005	0.010	0.015	0.019	0.024	0.028	0.028	0.028	0.028	0.029	0.029	0.030	0.032	0.033	0.034	0.035	0.010	-0.033	-0.077	0.024
10	0.000	0.004	0.008	0.012	0.016	0.020	0.019	0.016	0.012	0.008	0.005	0.000	0.002	0.005	0.008	0.011	0.008	-0.001	-0.054	-0.087	-0.022
11	0.000	0.004	0.008	0.013	0.017	0.019	0.013	0.008	0.002	-0.003	-0.013	-0.024	-0.035	-0.045	-0.047	-0.040	-0.061	-0.112	-0.095	-0.002	0.094
12	0.000	0.007	0.014	0.019	0.010	0.001	-0.012	-0.031	-0.045	-0.040	-0.094	-0.068	0.090	0.203	0.226	0.206	0.164	0.121	0.083	0.048	0.013
13	0.000	0.007	0.013	0.018	0.013	0.006	-0.004	-0.037	-0.071	-0.104	-0.157	-0.100	0.037	0.118	0.139	0.097	0.055	0.014	-0.016	-0.050	-0.084
14	0.000	0.006	0.012	0.014	0.011	0.007	-0.016	-0.038	-0.062	-0.141	-0.201	-0.225	-0.159	-0.002	0.033	0.010	-0.013	-0.036	-0.054	-0.073	-0.092
15	0.000	0.003	0.007	0.009	0.007	0.005	-0.012	-0.053	-0.092	-0.124	-0.196	-0.282	-0.290	-0.223	-0.162	-0.126	-0.104	-0.081	-0.064	-0.056	-0.047
16	0.000	0.004	0.008	-0.011	-0.016	-0.022	-0.037	-0.064	-0.098	-0.140	-0.190	-0.253	-0.302	-0.296	-0.234	-0.169	-0.116	-0.063	-0.044	-0.050	-0.057
17	0.000	0.007	0.015	-0.021	-0.029	-0.036	-0.051	-0.071	-0.092	-0.122	-0.167	-0.215	-0.261	-0.283	-0.251	-0.201	-0.146	-0.093	-0.070	-0.064	-0.068
18	0.000	0.008	0.017	-0.025	-0.032	-0.040	-0.051	-0.063	-0.075	-0.098	-0.127	-0.157	-0.194	-0.222	-0.209	-0.186	-0.136	-0.087	-0.058	-0.047	-0.036
19	0.000	0.011	0.022	-0.032	-0.040	-0.048	-0.057	-0.063	-0.069	-0.080	-0.106	-0.132	-0.158	-0.178	-0.171	-0.143	-0.134	-0.089	-0.053	-0.034	-0.014
20	0.000	0.014	0.026	-0.033	-0.038	-0.042	-0.050	-0.059	-0.067	-0.075	-0.089	-0.108	-0.134	-0.160	-0.186	-0.219	-0.255	-0.175	-0.097	-0.053	-0.024
21	0.000	0.008	0.020	-0.032	-0.038	-0.042	-0.050	-0.059	-0.067	-0.075	-0.089	-0.108	-0.134	-0.160	-0.186	-0.219	-0.255	-0.175	-0.097	-0.053	-0.024
22	0.000	0.005	0.012	-0.013	-0.007	0.001	0.002	-0.003	-0.016	-0.030	-0.045	-0.058	-0.070	-0.080	-0.080	-0.075	-0.127	-0.202	-0.292	-0.411	-0.513
23	0.000	0.008	0.014	-0.007	0.003	0.000	-0.018	-0.037	-0.055	-0.072	-0.083	-0.076	-0.140	-0.242	-0.398	-0.539	-0.734	-0.929	-0.989	-0.712	-0.140
24	0.000	0.004	0.008	0.001	0.007	0.012	0.002	-0.011	-0.026	-0.042	-0.050	-0.063	-0.076	-0.083	-0.074	-0.077	-0.095	-0.050	-0.006	0.049	0.111
25	0.000	0.002	0.002	-0.002	-0.006	-0.003	-0.005	-0.008	-0.016	-0.026	-0.015	0.028	0.079	0.149	0.338	0.554	0.742	0.699	0.547	0.395	0.243
26	0.000	0.003	0.002	-0.001	-0.002	-0.005	-0.005	-0.004	-0.005	-0.006	-0.009	0.017	0.025	0.027	0.003	0.031	0.065	0.116	0.171	0.340	0.508
27	0.000	0.000	0.002	0.004	0.001	-0.007	-0.015	-0.017	-0.010	-0.002	0.006	0.008	0.009	0.013	0.031	0.058	0.085	0.112	0.075	0.022	0.022
28	0.000	0.003	0.005	0.007	0.003	0.000	0.006	0.015	0.024	0.033	0.034	0.036	0.038	0.040	0.042	0.042	0.042	0.039	0.006	0.029	0.029
29	0.000	0.008	0.018	-0.028	-0.028	0.020	-0.011	-0.001	0.007	0.015	0.022	0.027	0.033	0.038	0.044	0.042	0.035	0.028	0.019	-0.023	-0.065
30	0.000	0.013	0.025	-0.038	-0.037	-0.027	-0.017	-0.008	-0.003	-0.003	-0.001	0.005	0.015	0.025	0.035	0.036	0.033	0.030	0.024	0.001	-0.022
31	0.000	0.007	-0.013	-0.020	-0.023	-0.028	-0.033	-0.038	-0.032	-0.026	-0.020	-0.013	0.005	0.003	0.011	0.016	0.021	0.026	0.027	0.021	0.014
32	0.000	0.007	-0.011	-0.018	-0.029	-0.039	-0.050	-0.050	-0.051	-0.051	-0.046	-0.041	-0.035	-0.029	-0.017	0.001	0.018	0.031	0.029	0.028	0.028
33	0.000	0.008	-0.015	-0.023	-0.030	-0.036	-0.042	-0.048	-0.051	-0.055	-0.058	-0.060	-0.062	-0.064	-0.065	-0.045	-0.023	0.000	0.018	0.024	0.029
34	0.000	0.010	-0.020	-0.030	-0.031	-0.029	-0.027	-0.027	-0.036	-0.046	-0.055	-0.063	-0.072	-0.080	-0.088	-0.077	-0.066	-0.055	-0.036	-0.009	0.027
35	0.000	0.002	-0.003	-0.005	-0.005	-0.004	-0.003	-0.006	-0.023	-0.039	-0.056	-0.063	-0.070	-0.077	-0.087	-0.096	-0.105	-0.114	-0.100	-0.067	-0.031
36	0.000	0.011	0.023	0.030	0.030	0.023	0.015	0.007	0.002	0.000	0.001	0.003	0.001	-0.005	-0.017	-0.038	-0.085	-0.140	-0.172	-0.152	-0.095

Tabela 7.35. Efektivna brzina deformacije: $\dot{\epsilon}_e [s^{-1}]$

$\frac{r}{R}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.141	0.141	0.143	0.141	0.124	0.100	0.088	0.111	0.152	0.188	0.211	0.221	0.215	0.198	0.172	0.145	0.122	0.107	0.091	0.075	0.061
2	0.099	0.097	0.096	0.094	0.092	0.076	0.080	0.126	0.185	0.186	0.177	0.169	0.159	0.134	0.110	0.091	0.080	0.069	0.061	0.058	0.059
3	0.086	0.083	0.081	0.077	0.073	0.061	0.078	0.129	0.175	0.166	0.158	0.150	0.138	0.112	0.088	0.077	0.068	0.061	0.058	0.062	0.071
4	0.075	0.070	0.067	0.061	0.055	0.048	0.078	0.129	0.149	0.141	0.133	0.126	0.112	0.089	0.073	0.065	0.058	0.055	0.057	0.067	0.081
5	0.055	0.049	0.046	0.043	0.040	0.046	0.095	0.127	0.124	0.120	0.117	0.105	0.089	0.069	0.057	0.049	0.045	0.048	0.055	0.065	0.084
6	0.044	0.039	0.032	0.026	0.022	0.018	0.055	0.090	0.083	0.078	0.074	0.071	0.062	0.056	0.049	0.044	0.037	0.042	0.057	0.056	0.086
7	0.032	0.025	0.017	0.012	0.015	0.020	0.041	0.057	0.056	0.063	0.072	0.080	0.092	0.083	0.070	0.058	0.048	0.041	0.049	0.064	0.093
8	0.032	0.026	0.036	0.041	0.046	0.047	0.047	0.059	0.075	0.094	0.114	0.135	0.145	0.131	0.118	0.103	0.081	0.059	0.052	0.058	0.109
9	0.061	0.060	0.064	0.068	0.073	0.078	0.076	0.098	0.120	0.143	0.166	0.189	0.188	0.175	0.162	0.149	0.135	0.096	0.068	0.060	0.124
10	0.125	0.121	0.119	0.118	0.119	0.121	0.128	0.145	0.163	0.181	0.199	0.214	0.212	0.209	0.207	0.205	0.175	0.124	0.096	0.085	0.076
11	0.181	0.179	0.178	0.177	0.176	0.177	0.188	0.200	0.212	0.224	0.236	0.238	0.234	0.230	0.224	0.184	0.126	0.118	0.102	0.012	0.161
12	0.181	0.178	0.176	0.177	0.196	0.216	0.236	0.235	0.228	0.186	0.118	0.077	0.156	0.268	0.271	0.191	0.127	0.195	0.272	0.226	0.181
13	0.245	0.240	0.236	0.231	0.235	0.242	0.267	0.305	0.305	0.181	0.143	0.117	0.041	0.077	0.093	0.085	0.097	0.124	0.108	0.086	0.074
14	0.318	0.311	0.305	0.294	0.277	0.261	0.265	0.304	0.344	0.255	0.183	0.173	0.153	0.085	0.056	0.047	0.041	0.041	0.040	0.047	0.056
15	0.378	0.369	0.360	0.344	0.318	0.292	0.298	0.329	0.359	0.306	0.227	0.203	0.200	0.159	0.119	0.085	0.067	0.069	0.068	0.042	0.027
16	0.426	0.414	0.402	0.385	0.355	0.325	0.311	0.320	0.346	0.313	0.230	0.196	0.208	0.204	0.169	0.141	0.136	0.146	0.128	0.073	0.034
17	0.432	0.424	0.414	0.401	0.375	0.349	0.326	0.306	0.298	0.278	0.226	0.182	0.197	0.227	0.213	0.198	0.195	0.203	0.184	0.135	0.088
18	0.435	0.423	0.409	0.391	0.373	0.355	0.327	0.286	0.247	0.211	0.172	0.152	0.170	0.205	0.209	0.214	0.208	0.205	0.189	0.148	0.107
19	0.424	0.413	0.400	0.378	0.363	0.349	0.323	0.278	0.234	0.186	0.148	0.139	0.160	0.192	0.206	0.220	0.222	0.218	0.193	0.152	0.111
20	0.385	0.384	0.377	0.355	0.337	0.322	0.293	0.249	0.203	0.162	0.134	0.122	0.143	0.183	0.201	0.217	0.236	0.230	0.219	0.189	0.153
21	0.355	0.352	0.347	0.318	0.290	0.269	0.237	0.197	0.158	0.125	0.107	0.105	0.126	0.162	0.221	0.244	0.249	0.243	0.242	0.165	0.097
22	0.323	0.320	0.317	0.277	0.245	0.222	0.192	0.156	0.121	0.094	0.083	0.091	0.120	0.180	0.276	0.385	0.491	0.597	0.704	0.559	0.340
23	0.323	0.319	0.296	0.243	0.212	0.166	0.118	0.089	0.087	0.126	0.221	0.367	0.510	0.653	0.594	0.338	0.635	0.984	1.299	1.538	1.484
24	0.300	0.296	0.272	0.219	0.190	0.150	0.106	0.080	0.075	0.112	0.198	0.331	0.466	0.605	0.750	0.886	0.961	1.055	1.152	1.274	1.413
25	0.267	0.268	0.255	0.204	0.175	0.138	0.099	0.073	0.068	0.100	0.135	0.180	0.232	0.286	0.203	0.396	0.563	0.875	1.152	1.457	1.716
26	0.267	0.267	0.268	0.238	0.205	0.184	0.160	0.131	0.102	0.078	0.069	0.070	0.094	0.124	0.147	0.183	0.222	0.261	0.287	0.206	0.473
27	0.180	0.177	0.177	0.174	0.155	0.142	0.130	0.112	0.093	0.073	0.058	0.052	0.061	0.064	0.105	0.097	0.076	0.065	0.058	0.063	0.136
28	0.154	0.146	0.138	0.130	0.110	0.094	0.079	0.067	0.062	0.058	0.055	0.044	0.038	0.049	0.068	0.076	0.070	0.064	0.056	0.007	0.047
29	0.080	0.076	0.073	0.069	0.066	0.049	0.042	0.039	0.038	0.036	0.035	0.030	0.026	0.031	0.040	0.045	0.042	0.040	0.037	0.046	0.064

Tabela 7.35. Efektivna brzina deformacije: $\dot{\epsilon}_e [s^{-1}]$ (nastavak)

$i \rightarrow$ $j \downarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
30	0.029	0.012	0.016	0.022	0.022	0.016	0.014	0.018	0.020	0.021	0.022	0.019	0.018	0.019	0.023	0.023	0.032	0.044	0.057	0.070	0.086
31	0.091	0.084	0.078	0.073	0.066	0.056	0.047	0.039	0.032	0.027	0.023	0.021	0.022	0.027	0.033	0.022	0.013	0.022	0.039	0.061	0.084
32	0.138	0.135	0.132	0.129	0.121	0.111	0.103	0.095	0.083	0.072	0.061	0.050	0.045	0.039	0.030	0.047	0.030	0.017	0.021	0.050	0.085
33	0.181	0.181	0.181	0.182	0.172	0.162	0.152	0.142	0.126	0.111	0.096	0.081	0.069	0.065	0.070	0.054	0.036	0.020	0.019	0.070	0.126
34	0.256	0.255	0.254	0.254	0.235	0.212	0.191	0.170	0.158	0.146	0.135	0.123	0.111	0.102	0.094	0.079	0.064	0.050	0.048	0.090	0.144
35	0.323	0.319	0.313	0.308	0.281	0.252	0.223	0.200	0.199	0.199	0.200	0.186	0.166	0.148	0.132	0.111	0.097	0.095	0.081	0.073	0.118
36	0.317	0.314	0.308	0.289	0.274	0.249	0.225	0.213	0.214	0.219	0.225	0.227	0.210	0.180	0.154	0.137	0.129	0.131	0.136	0.127	0.119

Slika 7.16. Radijalna brzina deformacije: $\dot{\epsilon}_r [s^{-1}]$ Slika 7.17. Aksijalna brzina deformacije: $\dot{\epsilon}_z [s^{-1}]$ Slika 7.18. Obodna brzina deformacije: $\dot{\epsilon}_\theta [s^{-1}]$ Slika 7.19. Smičuća brzina deformacije: $\dot{\gamma}_{rz} [s^{-1}]$ Slika 7.20. Efektivna brzina deformacije: $\dot{\epsilon}_e [s^{-1}]$

7.1.3. Određivanje napona - metod visioplastičnosti

Kod metoda fizičke diskretizacije (MFD) komponente tenzora napona se određuju metodom visioplastičnosti, koji se pokazao kao pogodan eksperimentalno teorijski metod. Ovaj metod je prilagođen za korišćenje u otvorenim kalupima. Metod se bazira na dobijanju aksijalne komponente napona σ_z rešavanjem osnovne jednačine visioplastičnosti (3.45), pri čemu je glavni problem određivanje integracione konstante C (3.52). S obzirom da se integracija osnovne jednačine visioplastičnosti vrši po radijusu, da bi se odredila integralna konstanta C mora se poznavati vrijednost aksijalne komponente napona u jednoj tački radijusa r za neku vrijednost visine z . Jedine tačke u kojima je moguće odrediti vrijednost aksijalne komponente napona su tačke za maksimalnu vrijednost radijusa na nivou vijenca (Slika 4.1.). Ove vrijednosti se određuju na osnovu (3.53) iz uslova da je radijalna komponenta napona u tim tačkama jednaka nuli: $\sigma_r=0$. Ostali deformaciono kinematski parametri su poznati, pri čemu se efektivni napon određuje sa odgovarajućih krivih ojačavanja za vrijednost efektivne deformacije.

Ako se sa $\Delta\sigma_{zv}$ obilježi prvi dio rešenja osnovne jednačine visioplastičnosti (3.52) onda se može pisati:

$$\sigma_{zv}\Big|_{\substack{z=z_v \\ r=r_{max}}} = \Delta\sigma_{zv}\Big|_{\substack{z=z_v \\ r=r_{max}}} + C_1, \quad (7.6)$$

pa je:

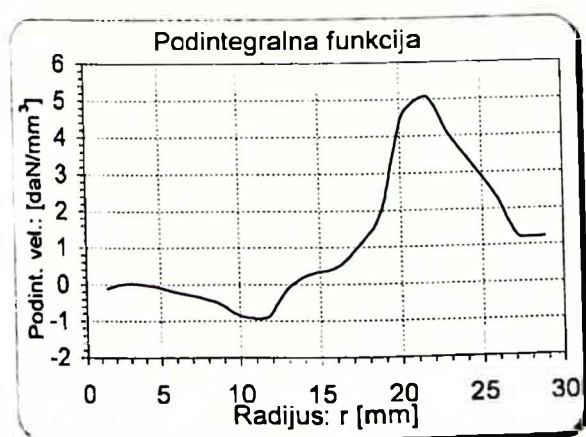
$$C_1 = \sigma_{zv}\Big|_{\substack{z=z_v \\ r=r_{max}}} - \Delta\sigma_{zv}\Big|_{\substack{z=z_v \\ r=r_{max}}}. \quad (7.7)$$

Kako je osnovna jednačina visioplastičnosti neodređena za vrijednost radijusa $r=0$ [mm], to se u ovoj tački vrijednost aksijalnog napona određuje korišćenjem uslova simetričnosti (3.46). Kriva se ekstrapolira kvadratnom funkcijom oblika:

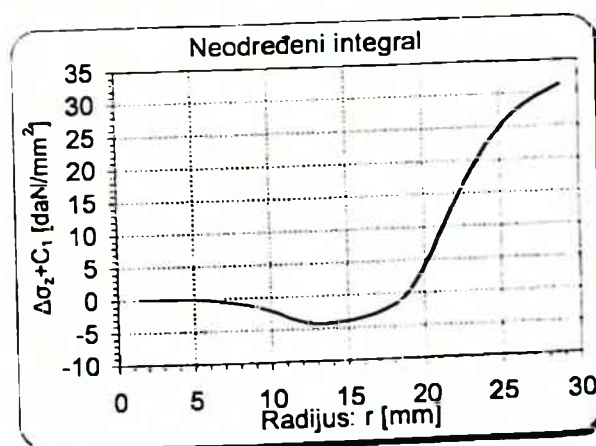
$$\sigma_z = ar^2 + b, \quad (7.8)$$

Koeficijenti a i b se određuju iz sistema dvije linearne jednačine sa dvije nepoznate za vrijednosti napona u drugoj i trećoj tački presjeka $z=z_v$.

Vrijednost podintegralne funkcije izraza (3.52) je poznata, jer su poznati svi deformacioni i kinematski parametri i efektivni napon i data je na Slici 7.21. Integraljenjem ove funkcije po r dobija se neodređeni integral dat na Slici 7.22., a integralna konstanta se određuje na prethodno opisani način.



Slika 7.21. Podintegralna funkcija jednačine visioplastičnosti u $[daN/mm^3]$ za presjek podione ravni



Slika 7.22. Neodređeni integral jednačine visioplastičnosti: $\Delta\sigma_{zv} + C_1$ $[daN/mm^2]$, u presjeku podione ravni

Zbog nepoznatog radijalnog napona u ostalim tačkama integracionu konstantu nije moguće odrediti. Iz tog razloga, na osnovu druge jednačine ravnoteže sistema (3.11) se dobija:

$$\sigma_{z0} = - \int_0^z \left(\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} \right) dz + C_2. \quad (7.9)$$

Ako se prvi član prethodnog izraza obilježi sa $\Delta\sigma_{z0}$ onda se može pisati da je:

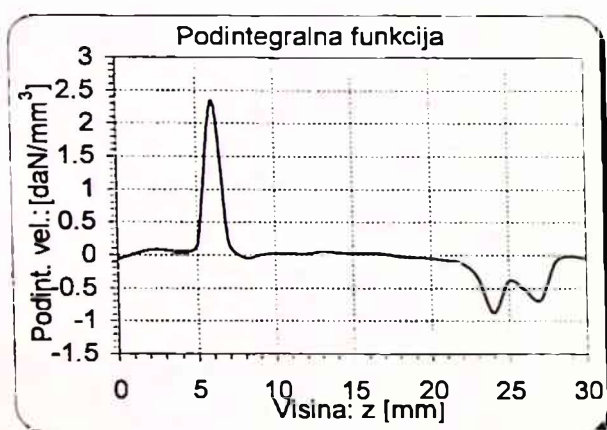
$$\sigma_{z0} \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=0}} = \Delta\sigma_{z0} \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=0}} + C_2, \quad (7.10)$$

pa je iz toga:

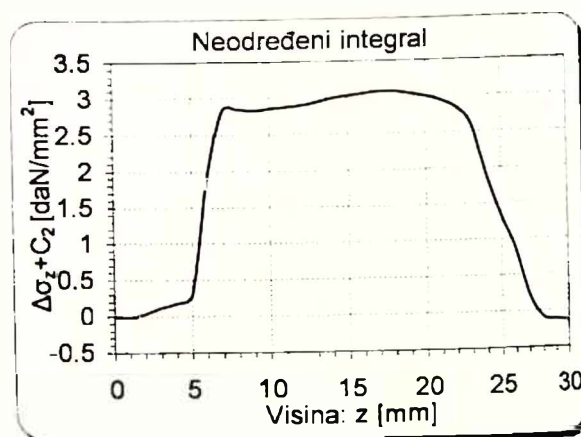
$$C_2 = \sigma_z \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=0}} - \Delta\sigma_{z0} \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=0}}. \quad (7.11)$$

Na taj način se dobijaju sve vrijednosti aksijalne komponente napona u osi simetrije obradka, tj. za $r=0$ [mm], što praktično predstavlja mogućnost za određivanje integracione konstante za sve vrijednosti visine z .

Vrijednosti podintegralne funkcije (7.9) u funkciji visine date su na Slici 7.23., a vrijednosti neodređenog integrala za $r=0$ [mm] na Slici 7.24. Integraciona konstanta se određuje na prethodno opisani način.



Slika 7.23. Podintegralna funkcija druge jednačine ravnoteže u $[daN/mm^3]$ za osu obradka



Slika 7.24. Neodređeni integral druge jednačine ravnoteže: $\Delta\sigma_{z0} + C_2$ $[daN/mm^2]$, u osi presjeka

Vrijednosti podintegralne funkcije osnovne jednačine visioplastičnosti u svim posmatranim tačkama presjeka obradka, date su u Tabeli 7.36., a vrijednost neodređenog integrala u Tabeli 7.37. Integraciona konstanta se određuje na osnovu:

$$\sigma_z \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=0}} = \Delta\sigma_z \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=0}} + C, \quad (7.12)$$

pa se dobija:

$$C = \sigma_z \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=0}} - \Delta\sigma_z \Big|_{\substack{z=z_v \\ r=0}} \quad (7.13)$$

i grafički je predstavljena na Slici 7.25. u funkciji visine z .

Tabela 7.36. Podintegralna funkcija jednačine visioplastičnosti u $[daN/mm^3]$

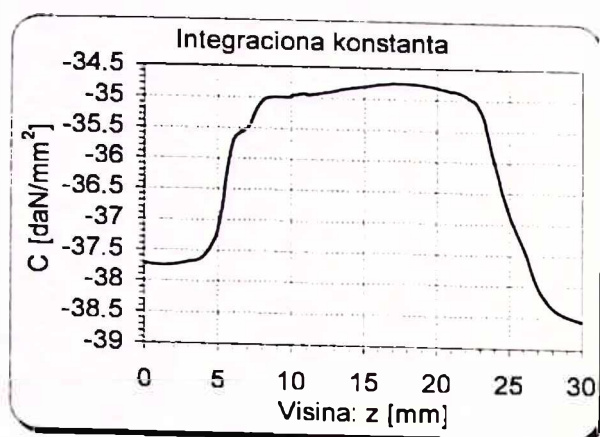
i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21					
1	Inf	-6.433	-3.276	-2.406	-2.933	-3.745	-1.380	-0.160	0.950	0.779	0.749	0.761	0.677	0.537	0.411	0.310	-0.445	-1.323	-1.757	-2.146	-2.076					
2		Inf	-5.829	-2.873	-1.794	-1.608	-2.614	-0.424	1.050	0.683	0.543	0.591	0.631	0.508	0.443	0.317	0.062	-0.660	-1.057	-1.671	-1.772	-1.591				
3			Inf	-5.438	-2.596	-1.567	-1.492	-1.818	-0.060	1.026	0.622	0.522	0.561	0.587	0.586	0.697	0.286	-0.266	-0.497	-0.853	-1.498	-1.469	-0.045			
4				Inf	-4.680	-2.055	-1.093	-1.039	-0.618	0.662	0.902	0.670	0.644	0.703	0.771	0.925	1.170	0.423	0.141	-0.163	-0.540	-1.764	-2.148	-1.300		
5					Inf	-4.602	-2.045	-0.979	-0.210	0.928	0.992	0.705	0.746	0.870	1.039	1.279	1.698	1.602	1.152	1.047	0.890	0.240	-0.624	-2.243	-5.764	
6						Inf	-4.417	-1.838	-0.428	-0.657	-0.380	0.731	0.862	1.043	1.197	1.202	1.379	1.880	0.784	0.623	0.967	1.059	0.172	-1.187	-2.534	-7.847

Tabela 7.36. Podintegralna funkcija jednačine visioplastičnosti u $[daN/mm^3]$ (nastavak)

μ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
7	Int	-4.525	-0.947	2.195	1.727	-1.108	-0.047	1.146	2.231	1.361	0.614	0.322	-0.262	-0.367	-0.146	0.190	0.640	0.635	-1.055	-3.415	-10.201
8	Int	-2.019	-0.253	-0.226	-0.098	-0.377	0.373	0.920	0.155	-0.276	-0.469	-0.540	-0.474	-0.425	-0.345	0.002	0.363	0.494	-0.167	-3.742	-12.100
9	Int	0.131	0.209	0.179	0.120	0.096	0.076	-0.085	-0.110	-0.136	-0.159	-0.202	-0.212	-0.252	-0.317	-0.400	-0.199	0.058	0.049	-2.959	-15.094
10	Int	0.209	0.138	0.070	0.011	0.001	0.079	0.069	0.070	0.062	-0.015	-0.033	-0.192	-0.288	-0.382	-0.443	-0.506	-0.595	-0.176	-1.128	-17.333
11	Int	0.083	0.031	0.002	-0.010	0.072	0.133	0.145	0.152	0.133	0.127	-0.010	-0.090	-0.164	-0.293	-0.448	-0.866	-0.451	-1.362	-6.271	-1.048
12	Int	0.044	0.001	0.041	0.122	0.132	0.093	-0.077	0.239	-0.508	-0.259	-1.947	-0.877	1.919	3.363	3.030	2.753	0.811	0.193	-0.743	-1.450
13	Int	0.011	-0.019	0.014	0.086	0.113	0.069	0.064	-0.070	-0.570	-0.149	-0.860	-1.136	-0.833	0.690	0.827	0.155	-0.677	-1.133	-1.674	-2.040
14	Int	-0.004	-0.033	-0.058	-0.056	-0.016	0.015	0.059	0.002	-0.375	-0.491	-0.312	-1.017	-3.031	-2.727	-2.493	-2.205	-1.685	-0.982	-0.655	-0.591
15	Int	-0.021	-0.063	-0.107	-0.146	-0.103	0.008	0.006	-0.064	-0.199	-0.824	-0.329	-0.155	-0.350	-0.893	-1.462	-1.898	-0.603	1.009	1.826	3.199
16	Int	-0.030	-0.071	-0.122	-0.177	-0.166	-0.143	-0.002	-0.035	-0.250	-0.952	-1.260	-0.812	-0.463	-0.526	-0.453	-0.241	0.010	0.079	1.100	5.064
17	Int	-0.049	-0.069	-0.088	-0.102	-0.111	-0.086	-0.047	-0.040	-0.168	-0.749	-1.552	-1.086	-0.212	-0.088	-0.273	-0.312	-0.222	-0.075	0.413	1.162
18	Int	-0.074	-0.090	-0.088	-0.079	-0.084	-0.109	-0.167	-0.235	-0.468	-1.070	-1.472	-0.919	-0.316	-0.100	-0.059	-0.213	-0.190	-0.005	0.184	0.555
19	Int	-0.080	-0.078	-0.062	-0.048	-0.052	-0.105	-0.211	-0.357	-0.739	-1.365	-1.443	-0.883	-0.441	-0.458	-0.398	-0.469	-0.360	-0.168	-0.087	-0.083
20	Int	-0.115	-0.051	-0.005	-0.011	-0.016	-0.099	-0.243	-0.451	-0.760	-1.197	-1.591	-1.086	-0.321	-0.172	-0.208	-0.312	-0.958	-0.915	-0.885	-5.015
21	Int	-0.116	-0.040	0.038	0.047	0.059	0.014	-0.105	-0.337	-0.779	-1.422	-1.393	-0.732	-0.355	0.266	0.008	0.754	0.273	0.337	1.075	6.268
22	Int	-0.159	-0.033	0.081	0.100	0.077	0.087	0.118	-0.033	-0.280	-0.737	-0.941	-0.041	0.200	0.260	0.289	0.629	1.002	1.728	3.274	7.395
23	Int	-0.103	0.043	0.104	0.073	0.067	-0.020	-0.454	0.652	0.009	0.209	0.368	0.561	1.095	2.842	6.529	3.954	3.729	3.125	2.334	0.757
24	Int	-0.112	0.023	-0.026	-0.188	-0.313	-0.488	-0.866	-0.937	-0.113	0.278	0.415	0.990	1.896	4.608	5.076	3.990	3.164	2.277	1.203	1.213
25	Int	-0.127	0.031	-0.072	-0.347	-0.610	-0.784	-1.213	-1.100	-0.176	0.338	0.989	2.002	1.180	2.892	2.996	2.083	2.307	1.417	0.644	0.013
26	Int	-0.183	-0.074	-0.019	-0.076	-0.266	-0.467	-0.654	-0.796	-0.970	-1.264	-1.238	-0.304	0.055	0.576	1.253	2.037	2.633	2.884	5.157	4.602
27	Int	-0.112	-0.056	-0.006	-0.096	-0.048	-0.055	-0.087	-0.181	-0.302	-0.727	-1.132	-0.223	0.383	0.483	0.366	0.407	0.937	2.023	1.687	-6.024
28	Int	-0.264	-0.336	-0.312	-0.272	-0.167	-0.070	0.029	-0.022	-0.012	-0.192	-0.873	-1.068	0.047	0.542	0.403	-0.092	-0.308	-0.967	-0.561	6.874
29	Int	-1.263	-1.882	-1.987	-1.762	-1.614	-1.145	-0.439	-0.460	-0.381	-0.566	-1.287	-1.768	-0.901	0.285	0.580	0.132	-0.241	-0.366	-0.373	0.073
30	Int	0.854	1.130	0.425	0.674	1.496	1.030	-0.678	-1.101	-1.341	-1.433	-1.591	-1.873	-1.333	-1.675	-1.794	-0.056	-0.121	-0.171	0.664	2.469
31	Int	0.722	1.278	1.492	1.477	1.488	1.319	0.596	0.548	0.700	0.990	0.358	-0.775	-1.603	-1.858	-2.433	-3.175	-1.013	0.516	0.343	0.411
32	Int	0.063	0.076	0.096	0.151	0.305	0.518	0.853	0.887	0.899	0.824	1.214	1.450	0.380	-0.739	-1.139	-1.862	-2.171	-2.231	-0.436	-0.031
33	Int	0.008	-0.020	-0.027	0.071	0.229	0.385	0.509	0.528	0.606	0.797	1.155	1.331	1.384	0.264	-0.191	-0.710	-2.485	-3.851	-0.899	-0.546
34	Int	0.080	0.081	0.099	0.198	0.318	0.416	0.406	0.346	0.338	0.396	0.645	0.895	1.037	0.278	0.052	-0.241	-0.868	-2.804	-1.392	-0.064
35	Int	0.190	0.237	0.271	0.262	0.266	0.245	0.198	0.213	0.263	0.338	0.568	0.784	0.993	1.197	1.111	1.163	0.130	-0.663	-2.122	-2.074
36	Int	0.225	0.297	0.315	0.289	0.213	0.134	0.075	0.131	0.286	0.518	0.727	0.993	1.263	1.346	1.289	0.994	0.503	0.015	-0.383	-0.794

Tabela 7.37. Neodređeni integral jednačine visioplastičnosti: $\Delta\sigma_z + C$ $[daN/mm^2]$

Tablica 159. Neobrađeni integrali jednadžine viskoelastičnosti: 20_2°C [rad/mm]																					
μ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	Int	0.000	-1.792	-2.892	-3.999	-5.438	-6.462	-6.717	-6.473	-6.119	-5.804	-5.490	-5.192	-4.945	-4.754	-4.606	-4.642	-5.052	-5.714	-6.552	-7.433
2	Int	0.000	-1.820	-2.818	-3.594	-4.628	-5.307	-5.030	-4.633	-4.360	-4.094	-3.804	-3.539	-3.319	-3.144	-3.059	-3.226	-3.647	-4.325	-5.142	-5.934
3	Int	0.000	-1.684	-2.569	-3.282	-4.078	-4.492	-4.166	-3.789	-3.530	-3.274	-3.000	-2.723	-2.416	-2.184	-2.210	-2.402	-2.730	-3.331	-4.032	-4.404
4	Int	0.000	-1.404	-2.060	-2.564	-2.959	-2.883	-2.484	-2.119	-1.810	-1.489	-1.137	-0.730	-0.214	0.147	0.264	0.246	0.071	-0.531	-1.501	-2.339
5	Int	0.000	-1.406	-2.059	-2.310	-2.055	-1.587	-1.193	-0.847	-0.457	0.006	0.568	1.312	2.104	2.743	3.263	3.725	3.985	3.868	3.150	1.159
6	Int	0.000	-1.339	-1.750	-2.022	-2.277	-2.133	-1.740	-1.272	-0.719	-0.140	0.481	1.301	1.904	2.225	2.619	3.118	3.414	3.119	2.191	-0.358
7	Int	0.000	-1.145	-1.568	-1.397	-0.384	0.109	0.430	1.345	2.209	2.640	2.853	2.832	2.667	2.542	2.564	2.801	3.110	3.007	1.872	-1.536
8	Int	0.000	-0.372	-0.488	-0.560	-0.689	-0.680	-0.313	-0.064	-0.125	-0.322	-0.577	-0.824	-1.042	-1.229	-1.306	-1.193	-0.970	-0.877	-1.847	-5.887
9	Int	0.000	0.093	0.188	0.259	0.311	0.353	0.343	0.293	0.231	0.158	0.066	-0.036	-0.151	-0.293	-0.477	-0.624	-0.638	-0.613	-1.279	-5.827
10	Int	0.000	0.083	0.131	0.147	0.149	0.172	0.209	0.243	0.276	0.294	0.289	0.227	0.102	-0.069	-0.278	-0.516	-0.796	-0.968	-1.265	-5.733
11	Int	0.000	0.028	0.034	0.030	0.049	0.111	0.188	0.271	0.349	0.420	0.449	0.416	0.343	0.213	0.005	-0.389	-0.729	-1.209	-3.631	-5.825
12	Int	0.000	0.010	0.029	0.113	0.232	0.336	0.335	0.179	-0.201	-0.532	-1.686	-3.001	-2.307	0.375	3.294	5.930	7.424	7.816	7.487	6.407
13	Int	0.000	-0.011	-0.014	-0.041	0.143	0.228	0.292	0.292	-0.080	-0.390	-0.913	-1.936	-2.900	-2.810	-2.043	-1.572	-1.914	-2.839	-4.253	-6.098
14	Int	0.000	-0.021	-0.070	-0.125	-0.159	-0.157	-0.114	-0.082	-0.292	-0.737	-1.111	-1.740	-3.976	-6.766	-9.281	-11.547	-13.408	-14.627	-15.366	-15.957
15	Int	0.000	-0.044	-0.131	-0.261	-0.384	-0.415	-0.408	-0.436	-0.568	-1.142	-1.679	-1.879	-2.121	-2.756	-3.962	-5.680	-6.892	-6.517	-5.053	-2.525
16	Int	0.000	-0.052	-0.151	-0.307	-0.475	-0.626	-0.680	-0.697	-0.834	-1.484	-2.594	-3.575	-4.137	-4.627	-5.108	-5.438	-5.518	-5.469	-4.915	-1.829
17	Int	0.000	-0.060	-0.139	-0.234	-0.341	-0.438	-0.497	-0.539	-0.636	-1.104	-2.362	-3.663	-4.188	-4.306	-4.495	-4.791	-5.054	-5.196	-5.013	-4.193
18	Int	0.000	-0.084	-0.171	-0.253	-0.333	-0.429	-0.568	-0.765	-1.119	-1.923	-3.252	-4.425	-4.956	-5.121	-5.189	-5.338	-5.538	-5.628	-5.527	-5.144
19	Int	0.000	-0.078	-0.147	-0.200	-0.249	-0.327	-0.489	-0.777	-1.334	-2.460	-3.868	-5.006	-5.580	-6.026	-6.444	-6.880	-7.291	-7.533	-7.643	-7.726
20	Int	0.000	-0.075	-0.094	-0.102	-0.116	-0.173	-0.351	-0.710	-1.331	-2.340	-3.795	-5.125	-5.722	-5.933	-6.120	-6.378	-7.084	-8.013	-8.899	-11.723
21	Int	0.000	-0.070	-0.060	-0.016	0.039	0.076	0.027	-0.204	-0.784	-1.984	-3.388	-4.419	-4.924	-4.907	-4.420	-3.711	-3.245	-2.945	-2.266	1.394
22	Int	0.000	-0.087	-0.043	0.057	0.147	0.233	0.345	0.391	0.214	-0.393	-1.087	-1.365	-1.237	-0.985	-0.695	-0.205	0.677	2.146	4.680	10.257
23	Int	0.000	-0.011	0.111	0.234	0.332	0.369	-0.010	-0.851	-1.253	-1.056	-0.626	0.045	1.229	4.076	11.474	18.594	23.985	29.032	33.055	35.090
24	Int	0.000	-0.020	-0.020	-0.188	-0.566	-1.157	-2.199	-3.523	-4.227	-4.018	-3.503	-2.467	-0.337	4.786	11.925	18.420	23.454	27.268	29.518	31.257
25	Int	0.000	-0.081	-0.152	-0.465	-1.188	-2.200	-3.707	-5.363	-6.198	-6.003	-4.995	-2.763	1.210	5.493	9.699	13.190	16.344	18.970	20.317	20.683
26	Int	0.000	-0.120	-0.157	-0.205	-0.395	-0.800	-1.414	-2.192	-3.131	-4.352	-5.668	-6.423	-6.510	-6.140	-5.123	-3.314	-0.775	2.139	6.623	11.832
27	Int	0.000	-0.078	-0.100	-0.106	-0.136	-0.187	-0.258	-0.396	-0.641	-1.176	-2.174	-2.822	-2.640	-2.185	-1.773	-1.390	-0.721	0.913	2.787	0.752
28	Int	0.000	-0.315	-0.636	-0.925	-1.137	-1.245	-1.248	-1.245	-1.265	-1.361	-1.952	-2.959	-3.416	-3.021	-2.547	-2.433	-2.650	-3.371	-4.160	-1.130
29	Int	0.000	-1.671	-3.606	-5.456	-7.116	-8.464	-9.137	-9.584	-9.992	-10.455	-11.417	-13.015	-14.338	-14.496	-13.996	-13.657	-13.755	-14.085	-14.457	-14.611
30	Int	0.000	0.585	1.287	1.821	2.998	4.257	4.268	3.321	2.080	0.703	-0.796	-2.546	-4.076	-5.577	-7.314	-8.062	-8.150	-8.303	-8.072	-6.450
31	Int	0.000	1.069	2.273	3.929	5.386	6.771	7.631	8.181	8.792	9.665	10.334	10.035	8.744	7.017	4.879	2.002	0.007	0.045	0.451	0.813
32	Int	0.000	0.069	0.153	0.275	0.504	0.920	1.638	2.997	3.373	4.120	5.220	6.570	7.451	7.132	6.170	4.627	2.598	0.430	-0.762	-0.901
33	Int	0.000	-0.010	-0.035	-0.014	0.144	0.459	0.915	1.422	1.977	2.668	3.654	4.895	6.230	6.981	6.961	6.499	4.834	1.496	-0.599	-1.221
34	Int	0.000	0.078	0.165	0.313	0.575	0.949	1.349	1.708	2.039	2.393	2.910	3.687	4.653	5.249	5.381	5.274	4.719	2.682	0.666	0.088
35	Int	0.000	0.212	0.464	0.721	0.977	1.225	1.434	1.632	1.865	2.159	2.610	3.286	4.166	5.262	6.372	7.478	8.077	7.558	6.196	4.157
36	Int	0.000	0.251	0.534	0.811	1.037	1.189	1.274	1.367	1.563	1.948	2.535	3.343	4.409	5.619	6.827	7.866	8.517	8.707	8.502	7.929



Slika 7.25. Integralna konstanta:
 C [daN/mm²], u funkciji visine z

dijagrami promjena navedenih naponskih parametara u funkciji radijusa r i visine z dati su na Slici 7.26. do Slike 7.30.

Za određivanje svih naponskih parametara po presjeku obradka metodom visioplastičnosti, svih numeričkih integracija i određivanja integracionih konstanti, napisan je Program P.3.3. u MATLAB-u, dat u Prilogu P.3. Kao ulazne podatke, pored krive ojačavanja i geometrijskih parametara kalupa, program koristi izlazne rezultate iz deformacione i kinematske analize.

Tabela 7.38. Aksijalni napon: σ_z [daN/mm²]

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-38.06	-38.66	-40.45	-41.55	-42.66	-44.10	-45.12	-45.38	-45.13	-44.78	-44.46	-44.15	-43.85	-43.60	-43.41	-43.26	-43.30	-43.71	-44.37	-45.21	-46.09
2	-37.95	-38.56	-40.38	-41.38	-42.15	-43.19	-43.87	-43.59	-43.19	-42.92	-42.65	-42.36	-42.10	-41.88	-41.70	-41.62	-41.78	-42.21	-42.88	-43.70	-44.49
3	-37.92	-38.48	-40.16	-41.05	-41.76	-42.56	-42.97	-42.64	-42.27	-42.01	-41.75	-41.48	-41.20	-40.89	-40.66	-40.69	-40.88	-41.21	-41.81	-42.51	-42.88
4	-37.88	-38.35	-39.75	-40.41	-40.91	-41.31	-41.23	-40.83	-40.47	-40.16	-39.84	-39.49	-39.08	-38.56	-38.20	-38.09	-38.10	-38.28	-38.88	-39.85	-40.69
5	-37.57	-38.04	-39.44	-40.10	-40.35	-40.09	-39.62	-39.23	-38.88	-38.49	-38.03	-37.47	-36.73	-35.93	-35.29	-34.77	-34.31	-34.05	-34.17	-34.89	-36.88
6	-36.94	-37.38	-38.72	-39.13	-39.41	-39.66	-39.52	-39.12	-38.66	-38.10	-37.52	-36.90	-36.08	-35.48	-35.16	-34.76	-34.27	-33.97	-34.26	-35.19	-37.74
7	-36.48	-36.86	-38.00	-37.43	-36.66	-36.47	-36.75	-36.43	-35.51	-34.65	-34.22	-34.01	-34.03	-34.19	-34.32	-34.29	-34.06	-33.75	-33.85	-34.99	-38.39
8	-35.92	-36.04	-36.41	-35.53	-36.60	-36.73	-36.72	-36.35	-36.10	-36.16	-36.36	-36.62	-36.86	-37.08	-37.27	-37.35	-37.23	-37.01	-36.92	-37.89	-41.93
9	-35.21	-35.17	-35.08	-34.99	-34.92	-34.86	-34.82	-34.83	-34.88	-34.94	-35.02	-35.11	-35.21	-35.33	-35.47	-35.65	-35.80	-35.81	-35.79	-36.45	-41.00
10	-34.96	-34.93	-34.85	-34.80	-34.79	-34.79	-34.76	-34.73	-34.69	-34.66	-34.64	-34.65	-34.71	-34.83	-35.00	-35.21	-35.45	-35.73	-35.90	-36.20	-40.67
11	-34.86	-34.85	-34.83	-34.82	-34.82	-34.81	-34.74	-34.67	-34.58	-34.51	-34.43	-34.41	-34.44	-34.51	-34.64	-34.85	-35.24	-35.58	-36.06	-38.49	-40.68
12	-34.86	-34.86	-34.85	-34.83	-34.75	-34.63	-34.52	-34.52	-34.68	-35.06	-35.39	-35.65	-37.86	-37.17	-34.48	-31.57	-28.93	-27.44	-27.04	-27.37	-28.45
13	-34.80	-34.80	-34.82	-34.82	-34.76	-34.66	-34.58	-34.51	-34.51	-34.88	-35.19	-35.72	-36.74	-37.70	-37.61	-36.85	-36.38	-36.72	-37.64	-39.06	-40.90
14	-34.76	-34.76	-34.78	-34.83	-34.89	-34.92	-34.92	-34.88	-34.85	-35.06	-35.50	-35.87	-36.50	-38.74	-41.53	-44.04	-46.31	-48.17	-49.39	-50.13	-50.72
15	-34.73	-34.74	-34.79	-34.87	-35.00	-35.13	-35.16	-35.15	-35.18	-35.31	-35.88	-36.42	-36.62	-36.86	-37.50	-38.71	-40.42	-41.64	-41.26	-39.80	-37.27
16	-34.73	-34.74	-34.80	-34.89	-35.05	-35.22	-35.37	-35.42	-35.44	-35.58	-36.23	-37.34	-38.32	-38.88	-39.37	-39.85	-40.18	-40.26	-40.21	-39.66	-36.57
17	-34.75	-34.77	-34.83	-34.91	-35.00	-35.11	-35.21	-35.27	-35.31	-35.40	-35.87	-37.13	-38.43	-38.96	-39.07	-39.26	-39.56	-39.82	-39.96	-39.78	-38.96
18	-34.78	-34.81	-34.89	-34.98	-35.06	-35.14	-35.23	-35.37	-35.57	-35.93	-36.73	-38.06	-39.23	-39.76	-39.93	-40.00	-40.14	-40.34	-40.43	-40.33	-39.95
19	-34.81	-34.84	-34.92	-34.99	-35.04	-35.09	-35.16	-35.33	-35.61	-36.17	-37.30	-38.71	-39.84	-40.42	-40.86	-41.28	-41.72	-42.13	-42.37	-42.48	-42.56
20	-34.86	-34.88	-34.95	-34.98	-35.00	-35.06	-35.23	-35.59	-36.21	-37.22	-38.68	-40.01	-40.61	-40.82	-41.00	-41.26	-41.97	-42.90	-43.78	-46.61	
21	-34.90	-34.93	-35.00	-34.99	-34.94	-34.89	-34.85	-34.90	-35.13	-35.71	-36.91	-38.31	-39.35	-39.85	-39.83	-39.35	-38.64	-38.17	-37.87	-37.19	-33.53
22	-34.93	-34.96	-35.04	-35.00	-34.90	-34.81	-34.72	-34.61	-34.56	-34.74	-35.35	-36.04	-36.32	-36.19	-35.94	-35.65	-35.16	-34.28	-32.81	-30.28	-24.70
23	-34.93	-34.93	-34.94	-34.82	-34.70	-34.60	-34.56	-34.94	-35.78	-36.18	-35.99	-35.56	-34.88	-33.70	-30.85	-23.46	-16.34	-10.95	-5.90	-1.88	0.16
24	-34.94	-34.95	-34.97	-34.97	-35.13	-35.51	-36.10	-37.14	-38.47	-39.17	-38.96	-38.45	-37.41	-35.28	-30.16	-23.02	-16.53	-11.49	-7.68	-5.43	-3.69
25	-34.95	-34.98	-35.06	-35.13	-35.44	-36.17	-37.18	-38.68	-40.34	-41.18	-40.98	-39.97	-37.74	-33.77	-29.48	-25.28	-21.79	-18.63	-16.01	-14.66	-14.29
26	-34.95	-34.95	-35.11	-35.15	-35.20	-35.39	-35.75	-36.40	-37.18	-38.12	-39.34	-40.66	-41.41	-41.50	-41.13	-40.11	-38.30	-35.77	-32.85	-28.37	-23.16
27	-34.97	-35.00	-35.07	-35.10	-35.13	-35.18	-35.25	-35.39	-35.64	-36.17	-37.17	-38.22	-39.02	-39.80	-41.30	-43.04	-43.79	-43.87	-44.03	-43.80	-42.17
28	-34.96	-35.06	-35.38	-35.70	-35.99	-36.20	-36.31	-36.31	-36.33	-36.42	-37.01	-38.02	-38.48	-38.08	-37.61	-37.49	-37.71	-38.43	-39.22	-36.19	
29	-34.96	-35.52	-37.19	-39.13	-40.97	-42.63	-43.98	-44.65	-45.10	-45.51	-45.97	-46.93	-48.54	-49.85	-50.01	-49.51	-49.17	-49.28	-49.60	-49.97	-50.13
30	-35.92	-35.72	-35.14	-34.44	-33.90	-32.73	-31.47	-31.46	-32.40	-33.64	-35.02	-36.52	-38.27	-39.80	-41.30	-43.04	-43.79	-43.87	-44.03	-43.80	-42.17
31	-37.51	-37.16	-36.09	-34.69	-33.23	-31.77	-30.39	-29.53	-28.98	-28.37	-27.49	-26.82	-27.12	-28.41	-30.14	-32.28	-35.16	-37.15	-37.11	-36.71	-36.35
32	-37.62	-37.60	-37.53	-37.45	-37.32	-37.09	-36.68	-35.96	-35.10	-34.23	-33.39	-32.38	-31.03	-30.15	-30.47	-31.43	-32.97	-35.00	-37.17	-38.36	-38.50
33	-37.69	-37.69	-37.70	-37.72	-37.70	-37.55	-37.23	-36.77	-36.27	-35.71	-35.02	-34.04	-32.79	-31.46	-30.71	-30.73	-31.19	-32.86	-36.19	-38.29	-38.91
34	-37.76	-37.74	-37.66	-37.57	-37.42	-37.16	-36.75	-36.39	-36.03	-35.70	-35.34	-34.83	-34.05	-33.08	-32.49	-32.36	-32.46	-33.02	-35.05	-37.07	-37.65
35	-37.82	-37.75	-37.54	-37.28	-37.03	-36.77	-36.52	-36.31	-36.12	-35.88	-35.59	-35.14	-34.46	-33.58	-32.49	-31.38	-30.27	-29.67	-29.99	-31.55	-33.59
36	-37.80	-37.72	-37.47	-37.18	-36.91	-36.68	-36.53	-36.44	-36.35	-36.16	-35.77	-35.18	-34.38	-33.31	-32.10	-30.89	-29.85	-29.20	-29.01	-29.27	-29.79

7. Zapreminsko deformisanje u otvorenim kalupima

Tabela 7.39. Radijalni napon: σ_r [daN/mm²]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
1	-37.43	-38.04	-39.88	-40.96	-41.77	-42.47	-42.55	-42.77	-42.87	-42.79	-42.67	-42.54	-42.41	-42.31	-42.26	-42.25	-42.41	-42.84	-43.41	-43.99	-44.43	
2	-36.40	-36.98	-38.81	-39.88	-40.73	-41.22	-41.26	-41.40	-41.30	-41.17	-41.05	-40.93	-40.84	-40.73	-40.72	-40.66	-40.61	-40.76	-41.08	-41.35	-41.86	
3	-36.02	-36.52	-38.24	-39.23	-40.06	-40.37	-40.56	-40.66	-40.50	-40.35	-40.23	-40.10	-39.98	-39.84	-39.86	-39.78	-39.82	-40.00	-40.27	-40.41	-40.48	
4	-35.72	-36.07	-37.52	-38.28	-38.92	-38.93	-39.13	-39.06	-38.83	-38.64	-38.45	-38.24	-38.02	-37.79	-37.72	-37.54	-37.47	-37.60	-37.71	-37.97	-38.13	
5	-35.43	-35.66	-37.05	-37.69	-37.99	-37.86	-38.05	-37.68	-37.43	-37.15	-36.80	-36.42	-35.93	-35.60	-35.15	-34.75	-34.44	-34.32	-34.26	-34.41	-34.25	
6	-34.75	-34.94	-36.41	-37.08	-37.85	-38.12	-38.13	-38.05	-37.67	-37.30	-36.97	-36.66	-36.49	-36.56	-36.36	-36.10	-35.90	-35.45	-35.06	-35.26	-35.12	
7	-34.43	-34.47	-36.04	-36.95	-37.91	-38.57	-36.74	-36.49	-36.42	-36.26	-36.21	-36.17	-36.44	-36.68	-36.92	-37.06	-36.94	-36.53	-35.76	-35.91	-35.72	
8	-36.35	-37.13	-38.13	-38.66	-39.00	-39.30	-38.70	-38.64	-38.69	-38.87	-39.13	-39.41	-39.65	-39.85	-40.02	-40.09	-40.08	-40.00	-39.55	-39.45	-39.17	
9	-37.39	-37.60	-37.60	-37.57	-37.55	-37.53	-37.58	-37.64	-37.72	-37.80	-37.90	-38.00	-38.07	-38.15	-38.27	-38.43	-38.55	-38.60	-38.55	-38.53	-38.16	
10	-37.45	-37.48	-37.43	-37.41	-37.40	-37.41	-37.47	-37.49	-37.50	-37.51	-37.52	-37.53	-37.55	-37.64	-37.78	-37.96	-38.16	-38.39	-38.47	-38.58	-37.70	
11	-37.44	-37.44	-37.41	-37.41	-37.42	-37.43	-37.42	-37.39	-37.35	-37.31	-37.25	-37.19	-37.18	-37.22	-37.32	-37.45	-37.66	-37.77	-38.52	-37.39	-37.96	
12	-37.44	-37.44	-37.44	-37.45	-37.46	-37.41	-37.34	-37.28	-37.38	-37.67	-37.66	-39.14	-35.14	-34.67	-32.14	-29.84	-29.72	-30.14	-30.00	-30.36	-31.47	
13	-37.41	-37.41	-37.41	-37.43	-37.42	-37.36	-37.31	-37.26	-37.25	-37.22	-37.06	-38.25	-39.41	-37.81	-38.14	-38.74	-39.17	-39.79	-40.71	-41.96	-43.23	
14	-37.39	-37.38	-37.39	-37.42	-37.44	-37.44	-37.47	-37.53	-37.58	-37.54	-37.15	-37.29	-38.74	-41.83	-44.54	-47.22	-49.44	-50.87	-51.31	-51.50	-51.66	
15	-37.36	-37.36	-37.39	-37.44	-37.49	-37.52	-37.60	-37.73	-37.86	-37.89	-37.94	-37.12	-37.31	-37.88	-38.74	-39.44	-39.71	-39.35	-38.58	-37.78	-37.58	
16	-37.34	-37.34	-37.37	-37.42	-37.49	-37.58	-37.75	-37.91	-38.05	-38.11	-38.20	-37.83	-37.83	-37.89	-38.09	-37.89	-37.49	-37.14	-37.07	-36.80	-35.85	
17	-37.33	-37.32	-37.34	-37.37	-37.42	-37.46	-37.53	-37.62	-37.72	-37.81	-37.91	-37.88	-37.37	-37.09	-36.94	-36.74	-36.66	-36.68	-36.81	-36.76	-36.20	
18	-37.31	-37.30	-37.33	-37.36	-37.41	-37.47	-37.54	-37.65	-37.77	-37.93	-38.11	-38.12	-37.79	-37.58	-37.43	-37.22	-37.13	-37.17	-37.23	-37.18	-36.87	
19	-37.24	-37.24	-37.28	-37.29	-37.33	-37.38	-37.46	-37.59	-37.77	-37.98	-38.17	-38.08	-38.07	-38.03	-38.17	-38.31	-38.65	-38.93	-39.14	-39.27	-39.38	
20	-37.08	-37.11	-37.17	-37.18	-37.25	-37.32	-37.40	-37.52	-37.69	-37.88	-38.14	-38.20	-38.16	-38.08	-38.19	-38.40	-38.71	-39.02	-39.73	-40.58	-43.43	
21	-36.89	-36.95	-37.09	-37.22	-37.30	-37.31	-37.28	-37.22	-37.21	-37.27	-37.46	-37.33	-37.29	-37.24	-36.90	-36.36	-35.67	-35.32	-35.29	-35.47	-34.61	
22	-37.16	-37.19	-37.29	-37.38	-37.36	-37.29	-37.17	-36.93	-36.55	-35.96	-35.28	-34.28	-33.66	-33.05	-32.60	-32.21	-31.69	-30.79	-29.32	-27.10	-23.10	
23	-37.16	-37.17	-37.26	-37.28	-37.18	-36.96	-36.50	-35.70	-34.32	-33.44	-32.73	-32.13	-31.41	-30.21	-27.60	-22.22	-13.78	-7.95	-2.60	1.71	3.85	
24	-37.24	-37.26	-37.35	-37.46	-37.62	-37.82	-37.96	-38.00	-36.95	-36.32	-35.67	-35.03	-33.94	-31.75	-26.59	-19.42	-12.91	-7.85	-4.03	-1.76	0.00	
25	-37.33	-37.37	-37.48	-37.63	-37.91	-38.49	-39.05	-39.50	-38.96	-38.34	-37.78	-36.67	-34.48	-30.62	-30.30	-37.87	-36.82	-35.02	-32.56	-29.77	-29.26	-25.73
26	-37.33	-37.38	-37.50	-37.61	-37.70	-37.87	-38.22	-38.68	-39.13	-39.35	-39.66	-39.01	-38.69	-38.40	-37.87	-36.82	-35.02	-32.56	-29.77	-29.26	-25.73	
27	-37.50	-37.55	-37.62	-37.64	-37.69	-37.71	-37.74	-37.74	-37.69	-37.54	-37.26	-36.59	-35.56	-34.68	-34.02	-33.62	-33.53	-33.65	-33.31	-34.38	-37.21	
28	-37.57	-37.64	-37.89	-38.12	-38.44	-38.68	-38.82	-38.82	-38.69	-38.52	-38.36	-38.12	-37.17	-36.13	-35.20	-34.63	-34.54	-34.80	-35.58	-36.72	-38.98	
29	-37.48	-38.04	-39.62	-41.45	-43.41	-45.15	-46.60	-47.33	-47.70	-47.97	-48.23	-48.50	-48.57	-48.41	-47.78	-46.93	-46.44	-46.41	-46.63	-47.01	-47.65	
30	-34.63	-33.24	-34.01	-34.17	-33.75	-33.56	-33.72	-34.48	-35.49	-36.76	-38.15	-39.57	-40.83	-41.48	-42.12	-41.80	-41.31	-40.99	-40.99	-40.68	-39.11	
31	-34.85	-34.45	-33.46	-32.15	-30.81	-29.50	-28.36	-27.95	-27.80	-27.83	-27.89	-28.32	-29.59	-31.33	-33.18	-35.05	-35.50	-34.83	-34.25	-33.66	-33.26	
32	-34.93	-34.91	-34.86	-34.80	-34.72	-34.57	-34.27	-33.70	-33.02	-32.41	-31.96	-31.74	-31.74	-32.12	-33.13	-34.15	-35.67	-36.97	-35.60	-35.44	-35.44	
33	-35.02	-35.01	-35.01	-35.02	-35.04	-34.96	-34.75	-34.43	-34.02	-33.61	-33.12	-32.59	-32.23	-32.06	-32.33	-32.40	-32.92	-34.58	-34.19	-35.24	-35.80	
34	-35.11	-35.08	-35.00	-34.92	-34.79	-34.60	-34.32	-34.03	-33.70	-33.40	-33.09	-32.73	-32.25	-31.69	-31.61	-31.43	-31.48	-31.93	-32.75	-34.03	-34.55	
35	-35.19	-35.13	-34.94	-34.70	-34.44	-34.20	-33.98	-33.81	-33.59	-33.34	-33.03	-32.67	-32.19	-31.58	-30.89	-30.34	-30.09	-30.51	-30.61	-29.98	-30.66	
36	-35.22	-35.16	-34.94	-34.68	-34.40	-34.15	-33.99	-33.91	-33.80	-33.56	-33.13	-32.53	-31.82	-30.98	-30.13	-29.22	-28.53	-28.28	-28.31	-28.14	-27.72	

Tabela 7.40. Obodni napon: σ_θ [daN/mm²]

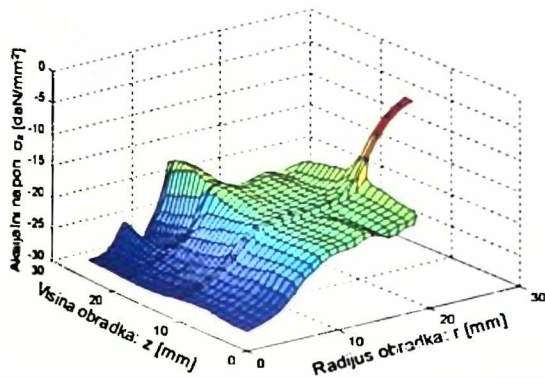
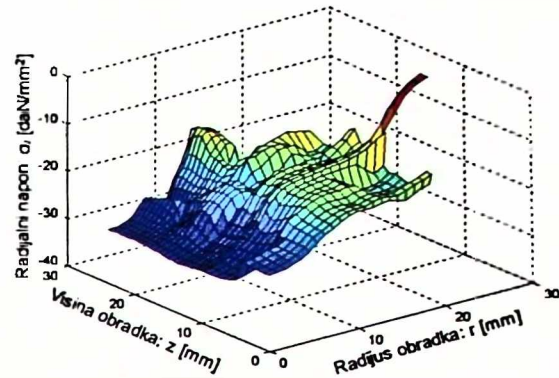
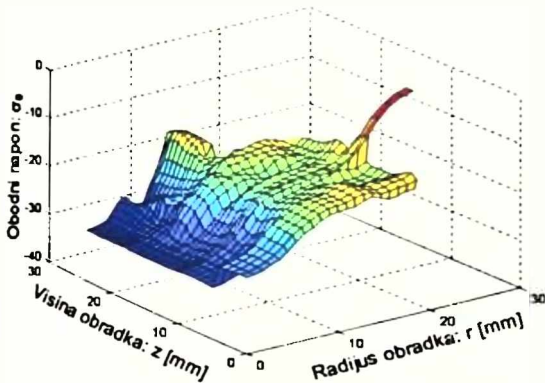
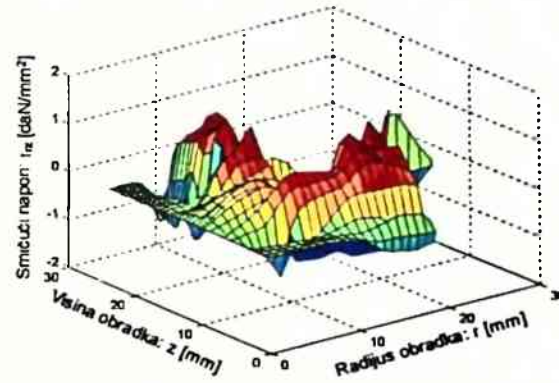
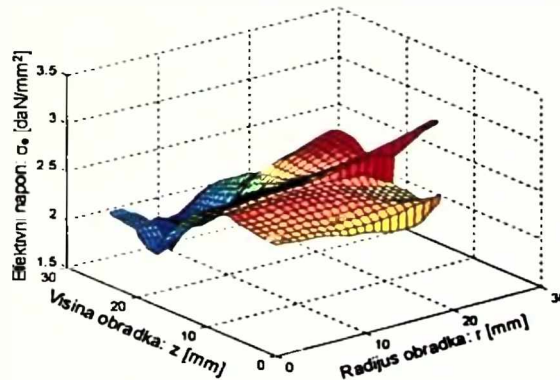
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-40.10	-40.72	-42.55	-43.63	-44.49	-45.18	-44.54	-43.38	-42.58	-42.02	-41.61	-41.26	-40.96	-40.75	-40.63	-40.60	-40.77	-41.28	-41.97	-42.73	-43.49
2	-39.07	-39.70	-41.53	-42.60	-43.45	-43.78	-42.24	-41.12	-40.45	-40.14	-39.87	-39.58	-39.34	-39.19	-39.12	-39.05	-39.09	-39.39	-40.03	-41.07	-42.31
3	-38.51	-39.09	-40.82	-41.84	-42.70	-42.71	-41.04	-40.14	-39.57	-39.31	-39.05	-38.77	-38.52	-38.29	-38.16	-38.03	-38.08	-38.35	-39.05	-40.08	-40.91
4	-37.89	-38.35	-39.85	-40.68	-41.39	-40.90	-39.15	-38.35	-37.88	-37.57	-37.25	-36.90	-36.52	-36.08	-35.77	-35.45	-35.38	-35.66	-36.46	-37.74	-38.57
5	-37.37	-37.81	-39.05	-39.48	-39.50	-38.48	-37.53	-36.86	-36.49	-36.08	-35.60	-35.07	-34.39	-33.77	-32.99	-32.30	-31.94	-32.08	-32.62	-33.56	-34.53
6	-36.65	-37.06	-38.62	-39.35	-40.07	-39.46	-37.26	-37.04	-36.48	-35.93	-35.44	-35.00	-34.65	-34.61	-34.17	-33.65	-32.98	-32.89	-33.50	-33.95	-35.22
7	-36.28	-36.70	-38.45	-39.00	-38.49	-37.92	-34.72	-34.42	-34.17	-34.10	-34.28	-34.50	-35.17	-35.40	-35.48	-35.37	-34.94	-34.27	-33.93	-34.85	-35.88
8	-37.73	-38.74	-39.09	-39.02	-38.80	-38.39	-36.37	-36.48	-36.90	-37.37	-37.84	-38.29	-38.72	-38.96	-39.20	-39.32	-39.22	-38.91	-38.15	-38.36	-39.50
9	-37.53	-37.59	-37.39	-37.18	-37.00	-36.85	-36.25	-36.46	-36.64	-36.79	-36.94	-37.10	-37.26	-37.42	-37.62	-37.87	-38.11	-38.23	-38.00	-37.65	-38.65
10	-37.42	-37.39	-37.27	-37.19	-37.15	-37.13	-37.01	-36.93	-36.87	-36.81	-36.77	-36.80	-36.92	-37.11	-37.35	-37.64	-37.95	-38.32	-38.35	-38.05	-38.50
11	-37.40	-37.39	-37.35	-37.34	-37.33	-37.28	-37.18	-37.06	-36.93	-36.82	-36.74	-36.76	-36.85	-36.99	-37.19	-37.48	-37.91	-37.89	-38.13	-35.41	-38.37
12	-37.40	-37.39	-37.36	-37.31	-37.15	-36.97	-36.83	-36.92	-37.18	-37.69	-37.86	-38.51	-35.55	-34.88	-32.18	-29.28	-27.70	-28.05	-28.20	-28.65	-29.92
13	-37.38	-37.38	-37.39	-37.36	-37.26	-37.12	-37.01	-36.96	-37.02	-37.55	-37.50	-37.95	-37.67	-36.49	-36.55	-36.58	-36.95	-37.77	-37.73	-40.19	-41.97
14	-37.37	-37.37	-37.38	-37.43	-37.48	-37.51	-37.50	-37.41	-37.35	-37.65	-37.90	-37.95	-38.74	-41.04	-43.18	-45.61	-47.64	-49.06	-49.82	-50.45	-51.02
15	-37.34	-37.35	-37.39	-37.48	-37.61	-37.74	-37.75	-37.71	-37.70	-37.91	-38.49	-38.33	-38.41	-38.78	-39.47	-40.38	-41.14	-40.97	-40.04	-38.86	-37.37
16	-37.32	-37.34	-37.39	-37.48	-37.64	-37.82	-37.98	-38.02	-37.99	-38.17	-38.91	-39.41	-39.58	-39.70	-40.04	-40.03	-39.63	-39.07	-38.75	-38.32	-36.04
17	-37.32	-37.34	-37.41	-37.48	-37.57	-37.69	-37.81	-37.91	-37.96	-38.09	-38.60	-39.45	-39.49	-39.20	-39.00	-38.78	-38.65	-38.54	-38.51	-38.31	-37.46
18	-37.31	-37.34	-37.43	-37.50	-37.56	-37.64	-37.78	-38.03	-38.37	-38.81	-39.58	-40.33	-40.26	-39.88	-39.60	-39.25	-39.09	-39.03	-38.95	-38.78	-38.27
19	-37.27	-37.29	-37.37	-37.39	-37.43	-37.50	-37.65	-37.98	-38.42	-39.13	-40.11	-40.67	-40.72	-40.49	-40.47	-40.44	-40.59	-40.76	-40.87	-40.85	-40.82
20	-37.18	-37.22	-37.29	-37.22	-37.29	-37.39	-37.58	-37.93	-38.46	-39.19	-40.08	-40.80	-40.86	-40.52	-40.37	-40.30	-40.35	-40.71	-41.41	-42.15	-44.89
21	-37.00	-37.07	-37.23	-37.29	-37.33	-37.36	-37.45	-37.68	-38.07	-38.73	-39.68	-40.11	-40.00	-39.68	-39.02	-38.27	-37.38	-36.78	-36.53	-36.29	-33.93
22	-37.32	-37.37	-37.49	-37.50	-37.46	-37.44	-37.47	-37.51	-37.63	-37.83	-37.95	-37.29	-36.36	-35.28	-34.51	-33.98	-33.39	-32.45	-30.94	-28.49	-23.62
23	-37.32	-37.36	-37.43	-37.38	-37.36	-37.46	-37.64	-37.91	-37.34	-36.08	-37.37	-33.92	-33.10	-31.85	-29.03	-22.55	-14.67	-9.03	-3.81	0.40	2.60
24	-37.43	-37.46	-37.53	-37.61	-37.87	-38.44	-39.23	-40.22	-40.13	-39.03	-37.70	-36.70	-35.45	-33.18	-29.50	-20.74	-14.19	-9.11	-5.25	-2.97	-1.21
25	-37.52	-37.57	-37.69	-37.83	-38.23	-39.11	-40.30	-41.76	-42.15	-41.12	-40.06	-38.53	-36.03	-31.92	-29.59	-26.02	-20.22	-16.56	-13.74	-12.29	-11.87
26	-37.52	-37.58	-37.72	-37.79	-37.89	-38.15	-38.64	-39.38	-40.29	-41.27	-42.25	-42.22	-41.57	-40.87	-40.00	-38.65	-36.64	-33.97	-31.00	-28.52	-24.36
27	-37.62	-37.69	-37.79	-37.83	-37.85	-37.91	-37.99	-38.13	-38.40	-38.78	-39.31	-39.59	-38.67	-37.30	-36.24	-35.58	-35.16	-34.60	-33.31	-33.00	-35.67
28	-37.66	-37.83	-38.21	-38.59	-38.89	-39.10	-39.20	-39.22	-39.26	-39.30	-39.36	-39.85	-39.81	-38.72	-37.42	-36.58	-36.31	-36.36	-36.90	-37.07	-37.46
29	-37.70	-38.34	-40.04	-41.98	-43.72	-45.40	-46.76	-47.45	-47.94	-48.35	-49.73	-49.64	-50.47	-50.55	-49.80	-48.80	-48.19	-48.02	-48.06	-48.37	-48.74
30	-35.17	-34.28	-34.47	-34.27	-33.01	-32.50	-32.38	-33.39	-34.42	-35.65	-37.13	-38.67	-40.43	-41.64	-42.70	-43.16	-42.94	-42.60	-42.54	-42.17	-40.50
31	-34.91	-34.43	-33.32	-31.87	-30.37	-28.92	-27.60	-26.94	-26.39	-25.87	-25.33	-25.35	-26.68	-28.85	-31.14	-33.12	-34.75	-35.87	-35.66	-35.05	-34.63
32	-34.91	-34.87	-34.78	-34.68	-34.53	-34.27	-33.84	-33.13	-32.26	-31.40	-30.64	-29.82	-29.15	-29.34	-30.56	-31.54	-32.94	-34.61	-35.81	-36.60	-36.76
33	-34.98	-34.98	-35.00	-35.03	-34.98	-34.77	-34.40	-33.89	-33.38	-32.82	-32.15	-31.22	-30.25	-29.58	-29.29	-29.68	-30.02	-31.45	-33.78	-36.35	-37.10
34	-35.06	-35.03	-34.94	-34.85	-34.68	-34.37	-33.94	-33.49	-33.14	-32.83	-32.51	-31.98	-31.20	-30.31	-29.90	-29.79	-29.95	-30.60	-32.47	-34.80	-35.62
35	-35.12	-35.04	-34.81	-34.54	-34.28	-34.01	-33.74	-33.51	-33.33	-33.14	-32.88	-32.59	-31.65	-30.72	-29.65	-28.77	-28.09	-28.30	-28.46	-28.84	-31.01
36	-35.15	-35.05	-34.77	-34.46	-34.12	-33.94	-33.74	-33.69	-33.60	-33.43	-33.08	-32.51	-31.63	-30.44	-29.13	-27.93	-27.12	-26.92	-27.07	-27.11	-27.21

Tabela 7.41. Smičući napon τ_z [daN/mm²]

$\begin{smallmatrix} j \rightarrow \\ i \downarrow \end{smallmatrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.00	0.03	0.05	0.08	0.11	0.17	0.21	0.19	0.16	0.15	0.15	0.17	0.21	0.26	0.33	0.43	0.53	0.61	0.64	0.61	0.48
2	0.00	0.01	0.03	0.05	0.07	0.12	0.17	0.14	0.13	0.15	0.18	0.22	0.26	0.32	0.40	0.41	0.31	0.16	-0.04	-0.22	-0.40
3	0.00	0.01	0.02	0.05	0.07	0.13	0.16	0.14	0.13	0.16	0.18	0.21	0.25	0.30	0.37	0.24	0.03	-0.24	-0.52	-0.69	-0.77
4	0.00	0.03	0.06	0.11	0.16	0.24	0.19	0.15	0.16	0.18	0.21	0.24	0.28	0.34	0.36	0.13	-0.19	-0.58	-0.88	-0.96	-0.61
5	0.00	0.14	0.25	0.37	0.49	0.50	0.26	0.24	0.28	0.33	0.37	0.42	0.49	0.61	0.46	0.11	-0.38	-0.86	-1.21	-1.37	-0.38
6	0.00	0.13	0.25	0.44	0.67	1.01	0.42	0.28	0.39	0.50	0.63	0.74	0.89	0.93	0.85	0.72	0.04	-0.78	-1.31	-1.35	-0.10
7	0.00	0.15	0.40	0.81	0.84	0.80	0.54	0.51	0.67	0.74	0.76	0.78	0.70	0.65	0.57	0.41	0.16	-0.28	-1.07	-1.42	-0.01
8	0.00	0.16	0.20	0.27	0.33	0.41	0.50	0.47	0.43	0.39	0.36	0.34	0.32	0.35	0.38	0.41	0.32	0.02	-0.76	-1.30	0.10
9	0.00	0.07	0.13	0.17	0.21	0.25	0.30	0.23	0.19	0.17	0.15	0.13	0.14	0.15	0.17	0.20	0.22	0.09	-0.43	-1.13	0.17
10	0.00	0.03	0.06	0.08	0.11	0.14	0.13	0.09	0.06	0.04	0.02	0.00	0.01	0.02	0.03	0.05	0.04	-0.01	-0.49	-0.91	-0.26
11	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.09	0.06	0.03	0.01	-0.01	-0.05	-0.09	-0.13	-0.17	-0.18	-0.19	-0.43	-0.85	-0.85	-0.17	0.52
12	0.00	0.03	0.07	0.09	0.04	0.00	-0.05	-0.11	-0.17	-0.19	-0.71	-0.80	0.52	0.67	0.74	0.95	1.13	0.54	0.27	0.18	0.06
13	0.00	0.02	0.05	0.07	0.05	0.02	-0.01	-0.11	-0.21	-0.51	-0.99	-0.78	0.83	1.40	1.35	1.04	0.52	0.10	-0.13	-0.51	-1.01
14	0.00	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	-0.05	-0.11	-0.16	-0.49	-1.00	-1.21	-0.97	-0.02	0.55	0.20	0.29	-0.82	-1.23	-1.40	-1.47
15	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	-0.03	-0.14	-0.23	-0.36	-0.79	-1.31	-1.37	-1.33	-1.29	-1.39	-1.45	-1.10	-0.87	-1.19	-1.52
16	0.00	-0.01	-0.02	-0.02	-0.04	-0.06	-0.10	-0.17	-0.25	-0.39	-0.75	-1.21	-1.39	-1.39	-1.32	-1.13	0.80	-0.40	-0.32	-0.62	-1.46
17	0.00	-0.01	-0.03	-0.04	-0.06	-0.08	-0.13	-0.19	-0.27	-0.39	-0.67	-1.10	-1.27	-1.20	-1.14	-0.97	-0.71	-0.43	-0.36	-0.47	-0.69
18	0.00	-0.02	-0.03	-0.05	-0.07	-0.09	-0.13	-0.18	-0.26	-0.41	-0.67	-0.97	-1.08	-1.04	-0.96	-0.83	-0.62	-0.40	-0.29	-0.30	-0.31
19	0.00	-0.02	-0.04	-0.07	-0.09	-0.11	-0.14	-0.19	-0.25	-0.38	-0.65	-0.88	-0.93	-0.89	-0.79	-0.62	-0.58	-0.39	-0.26	-0.21	-0.12
20	0.00	-0.03	-0.05	-0.07	-0.09	-0.10	-0.14	-0.20	-0.29	-0.42	-0.61	-0.83	-0.89	-0.84	-0.89	-0.97	-1.03	-0.73	-0.42	-0.36	-0.15
21	0.00	-0.02	-0.04	-0.07	-0.08	-0.09	-0.11	-0.17	-0.27	-0.41	-0.60	-0.79	-0.83	-0.79	-0.74	-0.76	-0.82	-0.91	-1.06	-1.36	-1.46
22	0.00	-0.01	-0.03	-0.04	-0.02	0.00	0.01	-0.02	-0.12	-0.30	-0.50	-0.60	-0.56	-0.43	-0.28	-0.19	-0.26	-0.35	-0.43	-0.75	-1.45
23	0.00	-0.02	-0.04	-0.02	0.01	0.00	-0.13	-0.39	-0.59	-0.55	-0.36	-0.21	-0.28	-0.38	-0.68	-1.52	-1.16	-0.99	-0.82	-0.50	-0.10
24	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.03	0.07	0.02	-0.12	-0.32	-0.36	-0.25	-0.19	-0.17	-0.14	-0.10	-0.09	-0.10	-0.05	-0.01	0.04	0.09
25	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.03	-0.02	-0.05	-0.10	-0.22	-0.25	-0.11	0.15	0.33	0.50	1.52	1.32	1.31	0.83	0.50	0.29	0.15
26	0.00	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	-0.02	-0.03	-0.02	-0.04	-0.07	-0.13	-0.23	-0.25	-0.21	-0.02	0.16	0.28	0.43	0.57	1.51	1.02
27	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	-0.04	-0.11	-0.14	-0.10	-0.03	0.09	0.15	0.14	0.10	0.11	0.30	0.70	1.19	1.49	1.05	0.14
28	0.00	0.02	0.03	0.05	0.02	0.00	0.00	0.08	0.23	0.38	0.55	0.70	0.86	0.71	0.54	0.51	0.55	0.60	0.62	0.71	-0.55
29	0.00	-0.10	-0.22	-0.36	-0.45	-0.37	-0.25	-0.03	0.18	0.37	0.58	0.83	1.15	1.15	1.01	0.85	0.75	0.63	0.46	-0.45	-0.91
30	0.00	-0.94	-1.46	-1.56	-1.50	-1.47	-1.10	-0.40	-0.24	-0.13	-0.02	0.24	0.78	1.21	1.42	1.39	0.94	0.61	0.37	0.01	-0.23
31	0.00	-0.08	-0.15	-0.25	-0.32	-0.46	-0.64	-0.89	-0.90	-0.88	-0.78	-0.55	-0.20	0.10	0.30	0.68	1.52	1.05	0.63	0.31	0.15
32	0.00	-0.03	-0.05	-0.08	-0.14	-0.23	-0.35	-0.47	-0.55	-0.64	-0.75	-0.84	-0.82	-0.65	-0.44	-0.32	0.02	0.92	1.31	0.53	0.30
33	0.00	-0.04	-0.08	-0.12	-0.16	-0.20	-0.25	-0.30	-0.37	-0.44	-0.54	-0.67	-0.81	-0.89	-0.84	-0.76	-0.58	-0.01	0.89	0.30	0.21
34	0.00	-0.04	-0.07	-0.11	-0.12	-0.12	-0.12	-0.14	-0.20	-0.28	-0.36	-0.46	-0.58	-0.71	-0.84	-0.88	-0.93	-1.00	-0.69	-0.05	0.17
35	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.03	-0.10	-0.18	-0.25	-0.30	-0.38	-0.46	-0.58	-0.77	-0.96	-1.08	-1.11	-0.84	-0.25
36	0.00	0.03	0.07	0.09	0.10	0.08	0.06	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	-0.03	-0.10	-0.24	-0.57	-0.90	-1.05	-1.01	-0.70

Tabela 7.42. Efektivni napon napon σ_e [daN/mm²]

Tabela 7.42. Efektivni napon napon σ_e [daN/mm ²]																					
$\begin{smallmatrix} j \rightarrow \\ i \downarrow \end{smallmatrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	2.43	2.43	2.43	2.43	2.41	2.38	2.36	2.38	2.44	2.48	2.51	2.53	2.53	2.51	2.49	2.45	2.41	2.38	2.37	2.39	2.43
2	2.37	2.37	2.37	2.37	2.36	2.36	2.33	2.30	2.36	2.44	2.44	2.44	2.44	2.43	2.40	2.36	2.36	2.40	2.45	2.50	2.52
3	2.34	2.32	2.32	2.32	2.32	2.28	2.22	2.30	2.38	2.37	2.37	2.37	2.37	2.36	2.33	2.31	2.38	2.45	2.52	2.56	2.57
4	2.30	2.28	2.28	2.28	2.28	2.24	2.12	2.23	2.28	2.28	2.28	2.28	2.28	2.27	2.32	2.42	2.50	2.56	2.59	2.61	2.59
5	2.30	2.28	2.27	2.25	2.23	2.18	1.94	2.13	2.15	2.17	2.20	2.21	2.23	2.28	2.38	2.46	2.53	2.59	2.63	2.65	2.59
6	2.31	2.31	2.30	2.30	2.29	2.27	2.10	1.87	2.01	2.09	2.16	2.21	2.27	2.34	2.40	2.46	2.54	2.60	2.64	2.64	2.58
7	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.32	2.23	2.22	2.28	2.33	2.36	2.38	2.42	2.43	2.46	2.52	2.57	2.61	2.64	2.66	2.60
8	2.37	2.37	2.38	2.38	2.38	2.37	2.34	2.37	2.41	2.45	2.48	2.51	2.52	2.52	2.53	2.56	2.59	2.62	2.63	2.65	2.62
9	2.42	2.42	2.43	2.43	2.43	2.44	2.44	2.47	2.50	2.53	2.55	2.57	2.57	2.55	2.56	2.57	2.59	2.62	2.64	2.66	2.64
10	2.50	2.50	2.50	2.50	2.51	2.51	2.52	2.54	2.55	2.57	2.59	2.60	2.58	2.58	2.59	2.60	2.61	2.63	2.65	2.68	2.70
11	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56	2.57	2.57	2.58	2.59	2.60	2.60	2.60	2.62	2.64	2.64	2.66	2.69	2.72	2.72	2.70
12	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56	2.57	2.59	2.60	2.60	2.62	2.64	2.68	2.72	2.70	2.66	2.65	2.64	2.63	2.62	2.62	2.62
13	2.60	2.59	2.59	2.58	2.58	2.59	2.60	2.62	2.65	2.67	2.73	2.76	2.75	2.73	2.72	2.72	2.72	2.72	2.71	2.71	2.69
14	2.62	2.61	2.60	2.59	2.57	2.56	2.57	2.60	2.64	2.68	2.75	2.79	2.80	2.78	2.77	2.77	2.77	2.77	2.75	2.72	2.68
15	2.62	2.61	2.61	2.59	2.55	2.51	2.52	2.58	2.63	2.66	2.75	2.82	2.84	2.83	2.82	2.81	2.80	2.79	2.77	2.71	2.64
16	2.60	2.59	2.58	2.56	2.52	2.50	2.51	2.56	2.61	2.65	2.74	2.82	2.86	2.87	2.86	2.84	2.83	2.82	2.78	2.70	2.61
17	2.58	2.56	2.55	2.52	2.50	2.48	2.49	2.53	2.59	2.64	2.72	2.80	2.86	2.88	2.87	2.87	2.85	2.84	2.80	2.74	2.67
18	2.53	2.51	2.49	2.46	2.43	2.43	2.44	2.51	2.59	2.66	2.73	2.79	2.85	2.88	2.87	2.87	2.86	2.85	2.83	2.78	2.72
19	2.45	2.43	2.41	2.36	2.35	2.37	2.41	2.50	2.58	2.66	2.74	2.80	2.85	2.87	2.87	2.87	2.86	2.86	2.84	2.80	2.77
20	2.28	2.28	2.28	2.23	2.29	2.36	2.45	2.54	2.62	2.68	2.74	2.79	2.84	2.88	2.88	2.87	2.87	2.85	2.84	2.81	2.77
21	2.05	2.09	2.16	2.27	2.38	2.45	2.53	2.60	2.66	2.71	2.75	2.80	2.84	2.88	2.88	2.87	2.87	2.85	2.84	2.81	2.77
22	2.32	2.33	2.36	2.44	2.51	2.56	2.61	2.66	2.70	2.74	2.78	2.81	2.85	2.89	2.95	3.00	3.04	3.08	3.11	3.05	2.88
23	2.32	2.34	2.41	2.52	2.58	2.65	2.71	2.76	2.81	2.85	2.92	2.99	3.05	3.10	3.07	2.86	3.02	3.14	3.21	3.26	3.26
24	2.40	2.42	2.48	2.57	2.62	2.68	2.72	2.76	2.81	2.85	2.91	2.98	3.03	3.08	3.13	3.16	3.18	3.20	3.22	3.24	3.22
25	2.48	2.50	2.53	2.61	2.65	2.69	2.73	2.76	2.80	2.84	2.86	2.88	2.87	2.87	2.75	2.83	2.98	3.10	3.19	3.26	3.32
26	2.48	2.49	2.51	2.56	2.60	2.63	2.67	2.70	2.72	2.75	2.77	2.80	2.83	2.86	2.87	2.88	2.89	2.88	2.86	2.75	2.84
27	2.63	2.63	2.63	2.64	2.67	2.68	2.70	2.71	2.73	2.75	2.76	2.77	2.79	2.81	2.82	2.80	2.77	2.73	2.70	2.63	2.59
28	2.68	2.68	2.69	2.69	2.71	2.72	2.72	2.73	2.74	2.75	2.76	2.77	2.79	2.81	2.82	2.80	2.77	2.73	2.70	2.63	2.59
29	2.69	2.69	2.70	2.70	2.72	2.73	2.74	2.74	2.75	2.75	2.76	2.76	2.77	2.77	2.78	2.77	2.75	2.72	2.70	2.65	2.60
30	2.71	2.71	2.71	2.71	2.72	2.73	2.74	2.74	2.75	2.75	2.76	2.76	2.77	2.77	2.78	2.77	2.75	2.73	2.71	2.69	2.67
31	2.72	2.72	2.72	2.72	2.73	2.73	2.73	2.73	2.73	2.74	2.74	2.74	2.75	2.75	2.75	2.74	2.73	2.72	2.72	2.71	2.70
32	2.71	2.71	2.71	2.71	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.72	2.71	2.71	2.70
33	2.69	2.69	2.70	2.70	2.71	2.71	2.71	2.71	2.71	2.70	2.70	2.69	2.70	2.71	2.71	2.72	2.72	2.71	2.71	2.71	2.71
34	2.68	2.69	2.69	2.69	2.70	2.69	2.69	2.68	2.68	2.67	2.67	2.67	2.67	2.69	2.70	2.71	2.71	2.72	2.73	2.74	2.74
35	2.66	2.66	2.67	2.67	2.67	2.67	2.67	2.67	2.67	2.67	2.67	2.67	2.67	2.67	2.66	2.66	2.67	2.69	2.72	2.76	2.80
36	2.61	2.62	2.62	2.63	2.64	2.64	2.65	2.65	2.66	2.66	2.66	2.66	2.66	2.66	2.64	2.62	2.60	2.56	2.52	2.50	2.46


Slika 7.26. Aksijalni napon: σ_z [daN/mm²]

Slika 7.27. Radijalni napon: σ_r [daN/mm²]

Slika 7.28. Obodni napon: σ_θ [daN/mm²]

Slika 7.29. Smičući napon: τ_{rz} [daN/mm²]

Slika 7.30. Efektivni napon: σ_e [daN/mm²]

7.2. NUMERIČKA SIMULACIJA (MKE)

Kao što je već naglašeno, numeričke simulacije metodom konačnih elemenata u ovoj Disertaciji su vršene korišćenjem softverskog paketa DEFORM, odnosno njegovog dijela DEFORM-2D koji je namijenjen za analizu ravanskih i osnosimetričnih deformisanja.

Kako bi mogli biti upoređeni rezultati metoda fizičke diskretizacije i numeričke simulacije metodom konačnih elemenata, simulacija se vrši u svim tačkama eksperimentalnog plana (Tabela 4.1.), tj. u ukupno 33 tačke - 32 tjemena hiperkuba i jedna centralna tačka plana. Potrebni podaci za DEFORM simulaciju u centralnoj tački plana, dati su u Tabeli 7.43. pri čemu

izrazi nijesu prevođeni, već se koriste engleski izrazi koji praktično predstavljaju standardnu, opšteprihvaćenu i poznatu terminologiju vezanu za numeričke simulacije.

U ostalim tačkama eksperimentalnog plana uzete su minimalne, odnosno maksimalne vrijednosti geometrijskih faktora kalupa, a variranje faktora temperature se vrši unošenjem odgovarajućih vrijednosti krivih ojačavanja i faktora trenja. Za simulacije se koriste ekvivalentne krive ojačavanja oblika (6.2), čiji su parametri dati u Tabeli 6.9. Vrijednosti faktora trenja su uzete iz Tabele 5.20. dobijene na osnovu DEFORM kalibracionih krivih. Geometrija donjeg kalupa je konstantna, a X, Y i R vrijednosti su nepromjenljive za sve tačke eksperimentalnog plana, dok su odgovarajući parametri gornjeg kalupa i priprema promjenljivi i zavise od geometrijskih parametara kalupa i dimenzija priprema (Tabela 4.2. i Tabela 4.3.). Za ostale vrijednosti parametara uzete su *default*-ne vrijednosti softverskog paketa DEFORM (Tabela 7.43.).

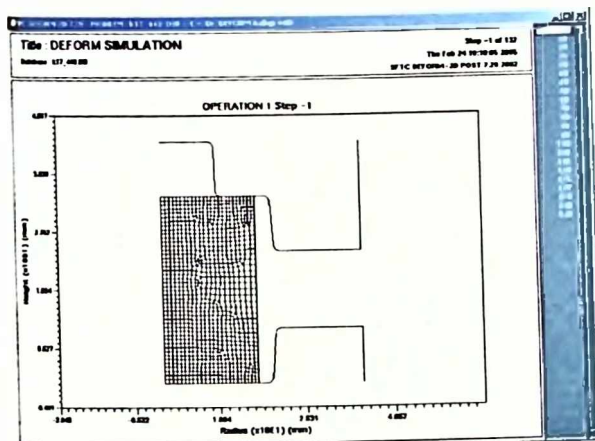
Tabela 7.43. Ulazni podaci za DEFORM simulaciju u centralnoj tački plana

Simulation Controls	Simulation Parameters	Units UNIT			<input checked="" type="checkbox"/> SI	
		Geometry GEOTYP			<input checked="" type="checkbox"/> Axisymmetric	
	Step Controls	Number of simulation steps			NSTEP=1000	
		Step increment to save			STPINC=10	
		Primary die			PDIE(1)=1	
		Steps by			<input checked="" type="checkbox"/> Stroke	
		Stroke per step			DSMAX=0.1 [mm]	
	Stopping Controls	Primary die displacement			SMAX=0,13.1215 [mm]	
Material Properties	Flow Stress data	Constant			(C)=30.3443 [MPa]	
		Strain exponent			(n)=0.097808	
Objects	Name: Gornji kalup <input checked="" type="checkbox"/> Rigid	Geometry		X [mm]	Y [mm]	R [mm]
			1	0	44.12	0
			2	9.6503659	44.12	1
			3	10	33.94	1
			4	19.3007320	33.94	1
			5	20	24.12	1
			6	35	24.12	0
			7	35	44.12	0
		Movement controls			Speed 2 [mm/s]	
					Angle -90°	
	Name: Donji kalup <input checked="" type="checkbox"/> Rigid	Geometry		X [mm]	Y [mm]	R [mm]
			1	35	0	0
			2	35	10	0
			3	20	10	1
			4	19.3007320	0	1
			5	0	0	0
	Name: Pripremak <input checked="" type="checkbox"/> Plastic	Geometry		X [mm]	Y [mm]	R [mm]
			1	0	0	0
			2	16.7800000	0	0
			3	16.7800000	33.94	0
			4	0	33.94	0
		Mesh	Number of mesh elements			MGNELM=1000
Inter Object Interface		Gornji kalup - - Pripremak	Contact relation CNTACT			<input checked="" type="checkbox"/> Master-Slave
			Friction model FRCFAC			Shear
	Friction			FRCFAC=0.114		
	Donji kalup - - Pripremak	Contact relation CNTACT			<input checked="" type="checkbox"/> Master-Slave	
		Friction model FRCFAC			Shear	
		Friction			FRCFAC=0.114	

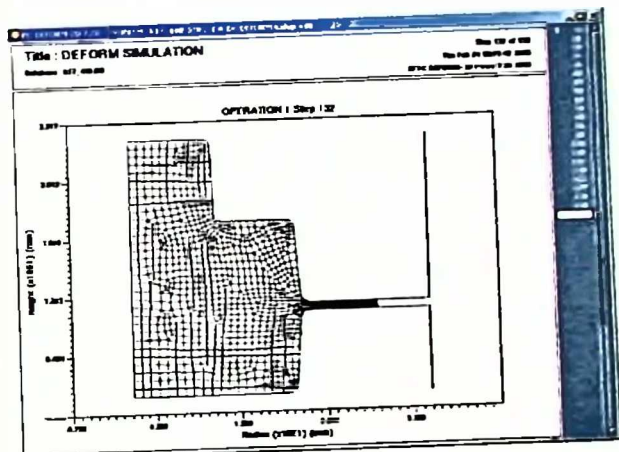
7. Zapreminsko deformisanje u otvorenim kalupima

Nakon unošenja ulaznih podataka i generisanja mreže od 1000 konačnih elemenata formira se početna baza podataka za početni korak, koji se označava kao -1. Na Slici 7.31 je dat izgled priprema sa generisanom mrežom konačnih elemenata u zahvatu sa kalupima. Nakon startovanja procesa simulacije vrše se numerički proračuni za vrijednost hoda po koraku $DSMAX=0.1$ [mm], pri čemu se u bazi podataka čuva svaki deseti korak. Kada parametri mreže konačnih elemenata dostignu kritične vrijednosti vrši se automatski *remeshing*. Za navedeni primjer simulacije *remeshing* je vršen 5 puta.

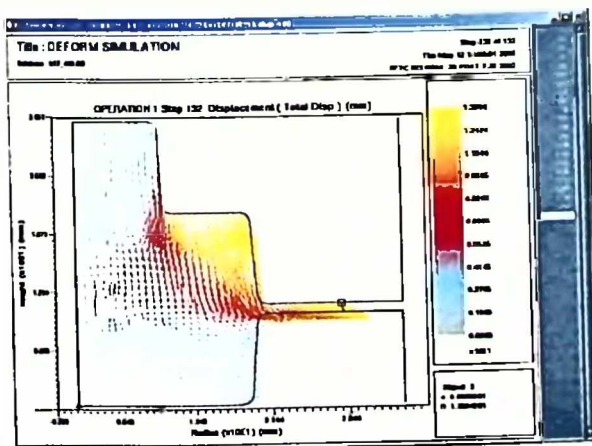
Konačan izgled obradka sa mrežom konačnih elemenata u zahvatu sa kalupima dat je na Slici 7.32. i ovi podaci se čuvaju u bazi podataka, gdje su još sačuvani i svi deformacioni, kinematski i naponski parametri deformisanja. Ovi parametri dati su u obliku osjencenih dijagrama na Slici 7.33. do Slike 7.49. Ovakvi dijagrami su pogodni za vizuelno sagledavanje distribucije vrijednosti parametara po presjeku obradka, međutim za određivanje numeričkih vrijednosti oni nijesu pogodni. U cilju prevazilaženja tog problema u DEFORM-u je moguće iz baze podataka izvući numeričke vrijednosti svih parametara za sve sačuvane korake, narednom "Data Extract".



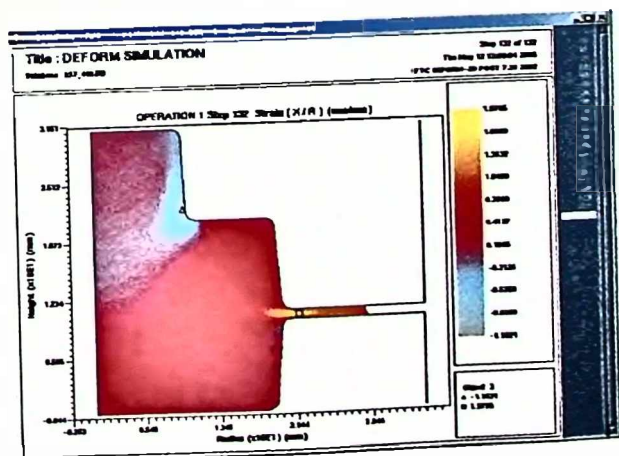
Slika 7.31. Priprema sa generisanom mrežom u zahvatu sa kalupima



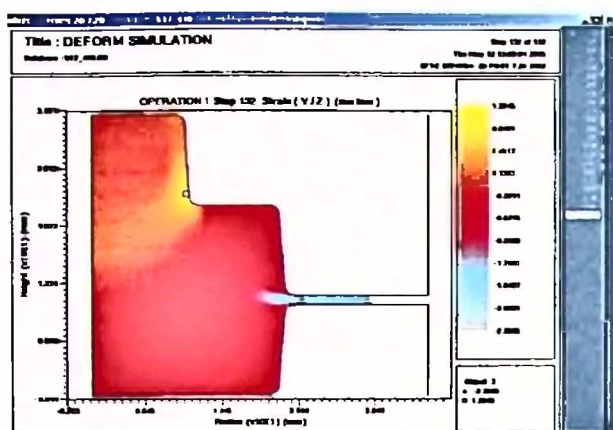
Slika 7.32. Obradak zahvatu sa kalupima na kraju procesa deformisanja



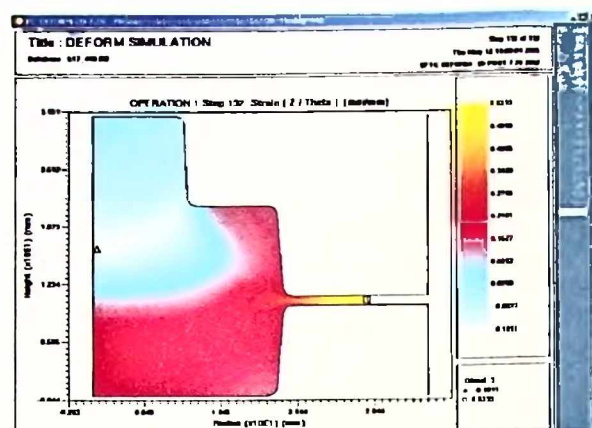
Slika 7.33. Pomjeranja tačaka presjeka dobijena DEFORM simulacijom



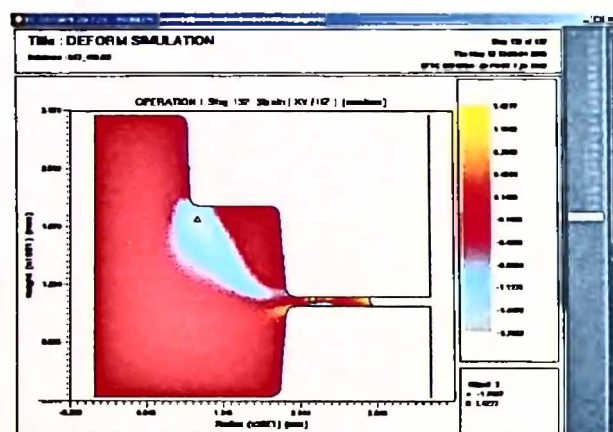
Slika 7.34. Radijalna logaritamska deformacija dobijena DEFORM simulacijom



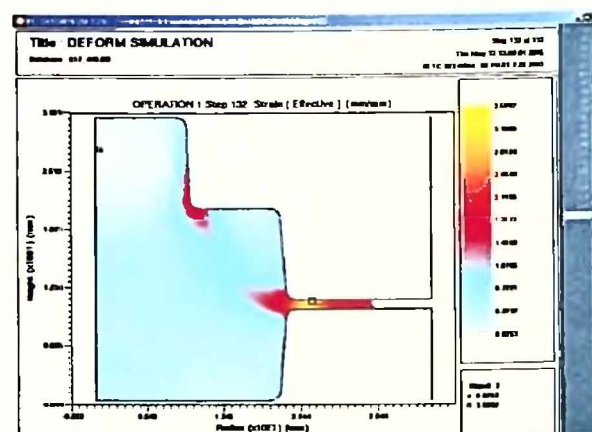
Slika 7.35. Aksijalna logaritamska deformacija dobijena DEFORM simulacijom



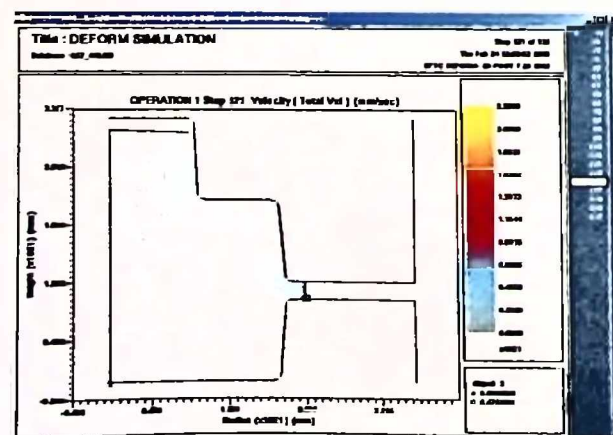
Slika 7.36. Obodna logaritamska deformacija dobijena DEFORM simulacijom



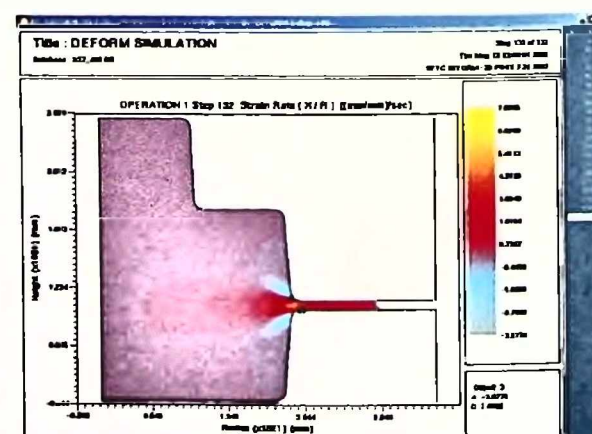
Slika 7.37. Smičuća deformacija dobijena DEFORM simulacijom



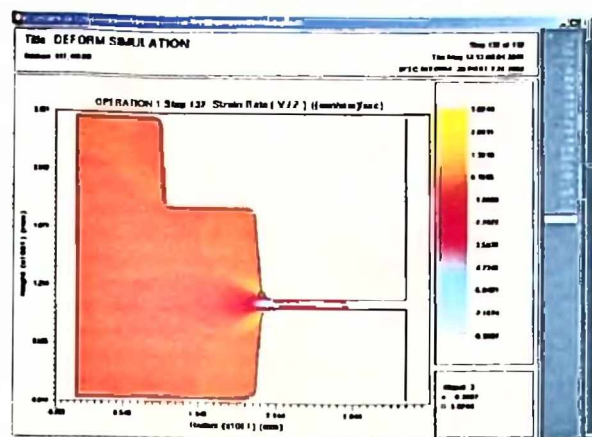
Slika 7.38. Efektivna deformacija dobijena DEFORM simulacijom



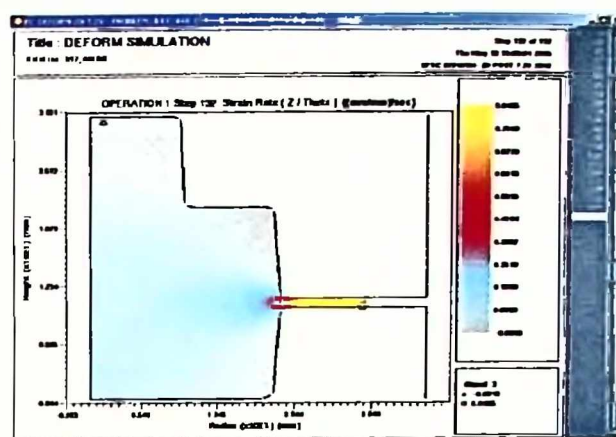
Slika 7.39. Brzine pomjeranja presjeka obradka dobijene DEFORM simulacijom



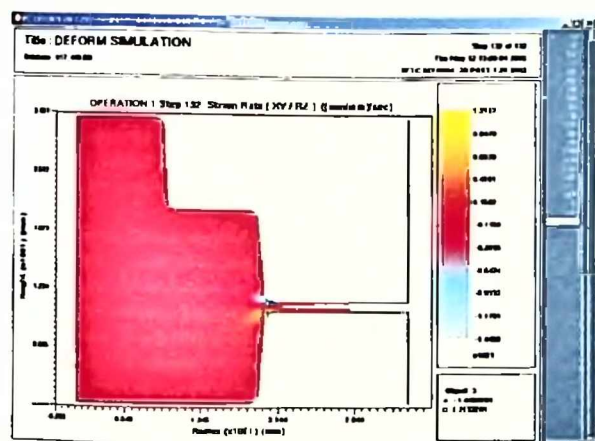
Slika 7.40. Radijalna brzina deformacije dobijena DEFORM simulacijom



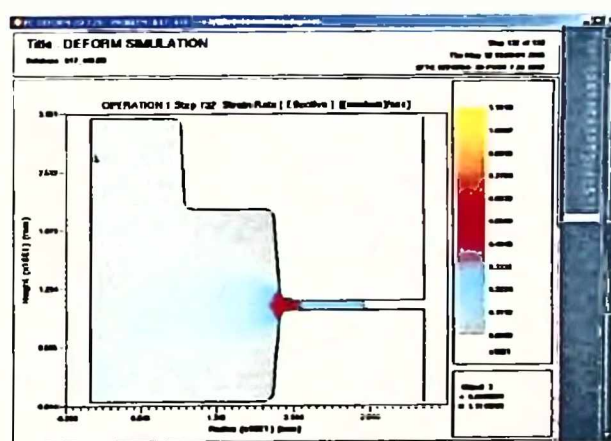
Slika 7.41. Aksijalna brzina deformacije dobijena DEFORM simulacijom



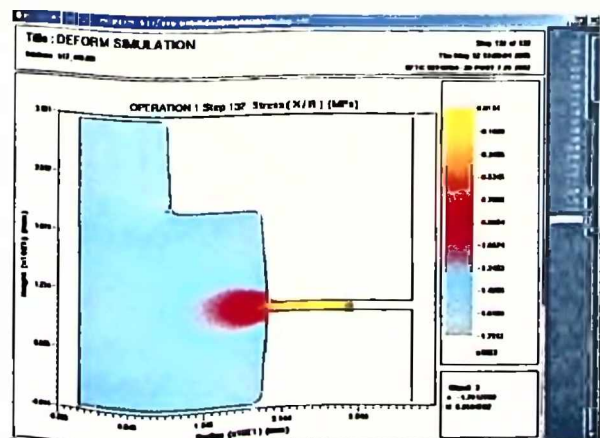
Slika 7.42. Obodna brzina logaritamske deformacije dobijena DEFORM simulacijom



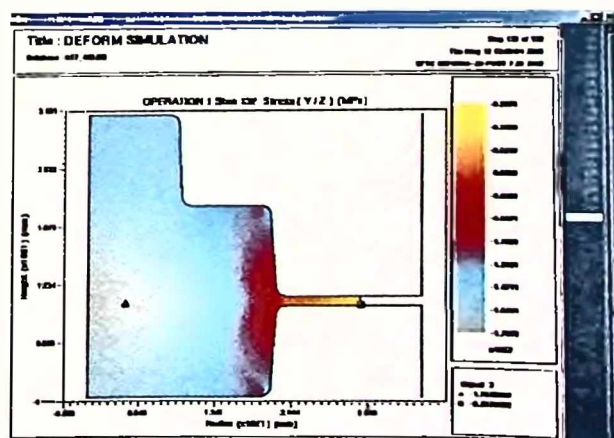
Slika 7.43. Smičuća brzina deformacije dobijena DEFORM simulacijom



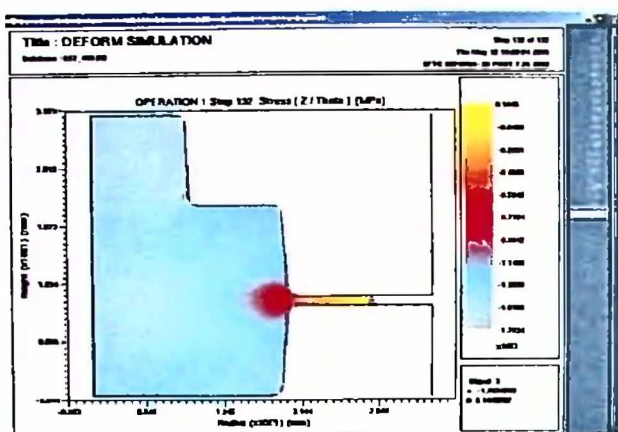
Slika 7.44. Efektivna brzina deformacije dobijena DEFORM simulacijom



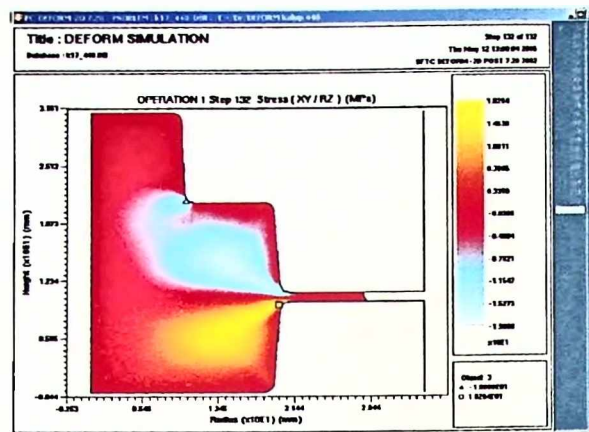
Slika 7.45. Radijalni napon dobijen DEFORM simulacijom



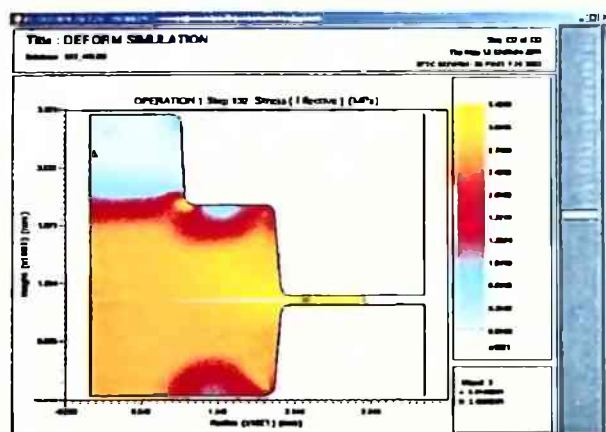
Slika 7.46. Aksijalni napon dobijen DEFORM simulacijom



Slika 7.47. Obodni napon dobijen DEFORM simulacijom



Slika 7.48. Smičući napon dobijen DEFORM simulacijom



Slika 7.49. Efektivni napon dobijen DEFORM simulacijom

7.3. REGRESIONA ANALIZA

Regresiona analiza se sprovodi sa ciljem dobijanja visokokorelativnih matematičkih modela naponsko deformacionih veličina procesa deformisanja u otvorenim kalupima istraživane familije stepenastih osnosimetričnih elemenata, u funkciji ulaznih faktora. Da bi regresiona analiza mogla biti korektno sprovedena potrebno je napraviti pravilan izbor što jednostavnijeg matematičkog modela. Visokokorelativni matematički model treba da zadovolji dva uslova:

1. da dobro aproksimira izlazne veličine po presjeku obradka, tj. u radijalnom i aksijalnom pravcu i
2. da dobro aproksimira izlazne veličine u svim tačkama hiperprostora ulaznih faktora u usvojenim granicama.

Prvi od dva navedena uslova je veoma teško zadovoljiti iz razloga što je praktično nemoguće izabrati model koji će opisati veoma heterogeno ponašanje parametara deformisanja u meridijalnoj ravni obradka. Drugi uslov se može zadovoljiti, s obzirom na karakter promjene parametara deformisanja, u okviru usvojenih granica intervala varijacije ulaznih faktora. Navedeni razlozi ukazuju na to da nije moguće usvojiti jedinstveni matematički model, koji će opisati promjene parametara deformisanja u hiperprostoru ulaznih faktora matrice plana eksperimenta u pojedinim tačkama meridijalnog presjeka, pa će regresiona analiza biti urađena po principu "Point by Point".

Kao tačke presjeka obradka u kojima se vrši regresiona analiza usvajaju se tačke $i=36$ presjeka po vertikali i $n=21$ presjek po horizontali, od ose simetrije do kraja konture obradka, kako je to definisano na Slici 7.6., što predstavlja ukupno 756 tačaka presjeka. U pitanju je relativno velikli broj tačaka, što uz korišćenje kompjutera ne predstavlja problem.

Za sprovođenje regresione analize urađeni su programi u MATLAB-u v. 7.0.0. koji posjeduje statističke alate za *Nonlinear Estimation*, korišćenjem *Gauss-Newton*-ovog metoda najmanjih kvadrata. Ulazni podaci za regresionu analizu su matrica vrijednosti ulaznih faktora u tačkama eksperimentalnog plana, vektori kolone izlaznih vrijednosti posmatranog parametra deformisanja za sve kombinacije vrijednosti ulaznih faktora i pojedine tačke presjeka obradka, a takođe i pretpostavljene vrijednosti parametara modela.

Što se tiče matematičkog modela u ovom radu je primijenjivano više različitih modela, ali većina su dali nezadovoljavajuće rezultate [109,120]. Rezultati sa visokim koeficijentom korelacije su dobijeni korišćenjem tzv. modela sa kvadratnom funkcijom odziva, koji se sastoji od linearnih članova, članova međudejstva faktora i kvadratnih članova. Takav model za četiri ulazna faktora, što je slučaj kod modeliranja deformacionih i kinematskih parametara procesa deformisanja ima oblik:

$$y = \beta_1 + \beta_2 x_1 + \beta_3 x_2 + \beta_4 x_3 + \beta_5 x_4 + \beta_6 x_1 x_2 + \beta_7 x_1 x_3 + \beta_8 x_1 x_4 + \beta_9 x_2 x_3 + \beta_{10} x_2 x_4 + \beta_{11} x_3 x_4 + \beta_{12} x_1^2 + \beta_{13} x_2^2 + \beta_{14} x_3^2 + \beta_{15} x_4^2. \quad (7.14)$$

Kod modeliranja naponskih parametara, zbog uvođenja petog faktora temperature, model ima oblik:

$$y = \beta_1 + \beta_2 x_1 + \beta_3 x_2 + \beta_4 x_3 + \beta_5 x_4 + \beta_6 x_5 + \beta_7 x_1 x_2 + \beta_8 x_1 x_3 + \beta_9 x_1 x_4 + \beta_{10} x_1 x_5 + \beta_{11} x_2 x_3 + \beta_{12} x_2 x_4 + \beta_{13} x_2 x_5 + \beta_{14} x_3 x_4 + \beta_{15} x_3 x_5 + \beta_{16} x_4 x_5 + \beta_{17} x_1^2 + \beta_{18} x_2^2 + \beta_{19} x_3^2 + \beta_{20} x_4^2 + \beta_{21} x_5^2. \quad (7.15)$$

S obzirom da postoji relativno veliki broj deformacionih, kinematskih i naponskih parametara procesa deformisanja (ukupno 15) i da je za svaki parametar neophodno odrediti modele u 756 tačaka presjeka meridijalne ravni, to ih je zbog obimnosti nemoguće dati u radu, pa se kao primjer daju parametri modela efektivne logaritamske deformacije u usvojenim tačkama meridijalnog presjeka u Prilogu P.5. (Tabela P.5.1. do Tabele P.5.15.).

Na osnovu ovako dobijenih datoteka parametara modela, moguće je dobiti modelske vrijednosti svih naponsko deformacionih veličina procesa deformisanja, koji na 3D dijagramima izgledaju veoma slično sa dijagramima odgovarajućih veličina dobijenih MFD, pa se iz tog razloga eksplicitno ne daju u radu.

8. ANALIZA I POREĐENJE REZULTATA ZAPREMINSKOG DEFORMISANJA U OTVORENIM KALUPIMA

O okviru zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima familije stepenastih osnosimetričnih odkovaka, urađena je kompletna naponsko deformaciona analiza. Dobijeni su svi deformacioni, kinematski i naponski parametri metodom fizičke diskretizacije i izvršeno je njihovo modeliranje. Takođe je urađena numerička DEFORM simulacija. U cilju dobijanja adekvatnih zaključaka sprovodi se analiza rezultata i vrši njihovo poređenje.

8.1. ANALIZA DEFORMACIJA

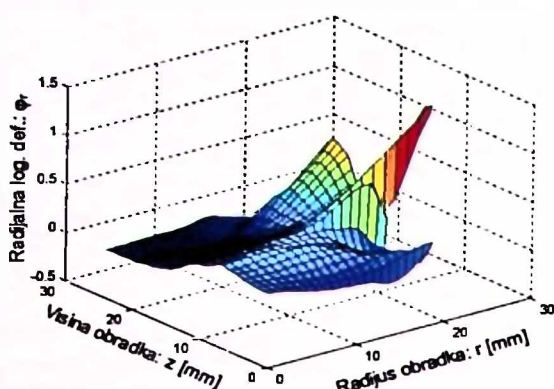
Kod analize deformacija razmatran je uticaj geometrijskih parametara, dok je utvrđeno da je uticaj faktora temperature zanemarljiv u rasponu temperatura tople obrade legure aluminijua AlMgSi0,5 : $t=(420\div 440)$ [$^{\circ}\text{C}$]. Iz tog razloga urađeno je određivanje deformacija u funkciji četiri ulazna faktora, i to: tri geometrijska faktora kalupa i faktor odnosa dimenzija priprema. Kao tipski slučaj za analizu uzeta je centralna tačka eksperimentalnog plana broj 18, za koju su dati 3D dijagrami komponenata deformacija u prethodnom Poglavlju (Slika 7.7. do Slike 7.11.). Odstupanja promjene deformacija u drugim tačkama plana od tipskog slučaja, data su kroz konkretne primjere.

8.1.1. Analiza deformacija dobijenih MFD

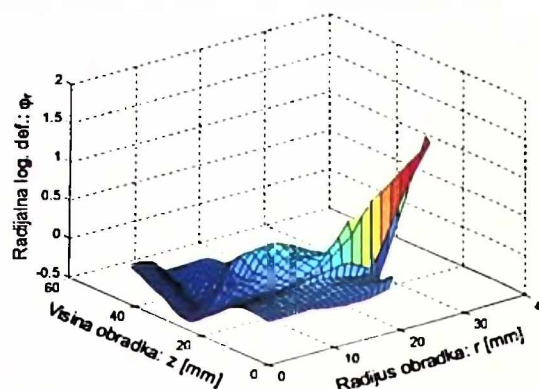
U zoni vijenca dolazi do pojave ekstremnih vrijednosti radijalne logaritamske deformacije, koja se kreće do: $\varphi_{r\max}=1.85$, za maksimalnu vrijednost radijusa. Ova pojava je prisutna u svim tačkama eksperimentalnog plana i radijalna logaritamska deformacija se kreće u rasponu $\varphi_{r\max}=(1.25\div 1.85)$. Sa smanjenjem prečnika priprema ova vrijednost raste.

U zoni kalupa radijalna logaritamska deformacija je najvećim dijelom pozitivna što znači da se materijal priprema širi u radijalnom pravcu. U dijelu koji odgovara drugom stepenu kalupa radijalna deformacija je mala i vrijednosti su veoma bliske nuli. Vrijednosti su povećane u predjelu donjeg kalupa, a najveće vrijednosti su u prvom nivou gornjeg kalupa za vrijednosti radijusa: $r>10$ [mm] i kreću se do: $\varphi_r<0.5$. U tačkama eksperimentalnog plana broj 2, 4, 6, i 8 (Slika 8.1.) vrijednosti radijalne logaritamske deformacije u prvom nivou gornjeg kalupa permanentno rastu za vrijednosti radijusa veće od maksimalnog radijusa drugog nivoa, tako da dostižu vrijednosti skoro dvostruko veće od odgovarajućih vrijednosti u ostalim tačkama, na šta utiče povećanje prečnika drugog nivoa i smanjenje prečnika priprema.

Negativne vrijednosti radijalne logaritamske deformacije su zastupljene u središnjem dijelu gornjeg kalupa u blizini ose simetrije. Ove vrijednosti su izraženije kod tačaka eksperimentalnog plana sa maksimalnom vrijednošću faktora visine drugog nivoa gornjeg kalupa (Slika 8.2.).



Slika 8.1. Radijalna logaritamska deformacija u tački 2 eksperimentalnog plana



Slika 8.2. Radijalna logaritamska deformacija u tački 15 eksperimentalnog plana

Ekstremne vrijednosti u zoni kalupa su dobijene na prelazu iz donjeg i gornjeg kalupa u vijenac, tj. za $r=20$ [mm] i ove vrijednosti su negativne i kreću se do: $\varphi_r=-0.32$. Ovo znači da se usled otpora isticanju materijala u vijenac, sabijanjem dio materijala vraća u kalup, pa se radijus na tom dijelu smanjuje.

Aksijalna logaritamska deformacija ima analogan karakter promjene kao radijalna, s tom razlikom što većim dijelom ima negativne vrijednosti i veći odnos između ekstremnih vrijednosti u zoni vijenca i unutrašnjosti kalupa (Slika 7.8.). Ekstremna, tj. minimalna vrijednost u vijencu u centralnoj tački plana iznosi: $\varphi_{zmin}=-2.39$, dok se u ostalim tačkama kreće u rasponu: $\varphi_{zmin}=-(1.65 \div 2.43)$. Ove vrijednosti su manje za prvih osam tačaka eksperimentalnog plana, odnosno za manje prečnike pripremk.

U drugom nivou gornjeg kalupa vrijednosti aksijalne logaritamske deformacije su bliske nuli. Najniže vrijednosti u kalupu su dobijene za prvi nivo gornjeg kalupa i radijuse: $r>10$ [mm] i kreću se do: $\varphi_z>-0.5$. Najviše pozitivne vrijednosti su u blizini ose simetrije po sredini gornjeg kalupa i kreću se do: $\varphi_z<0.25$, dok su u donjem dijelu kalupa vrijednosti ujednačene i kreću se približno oko: $\varphi_z\sim 0.3$. Ekstremna vrijednost je dobijena na prelazu donjeg kalupa u vijenac i iznosi: $\varphi_z=0.12$.

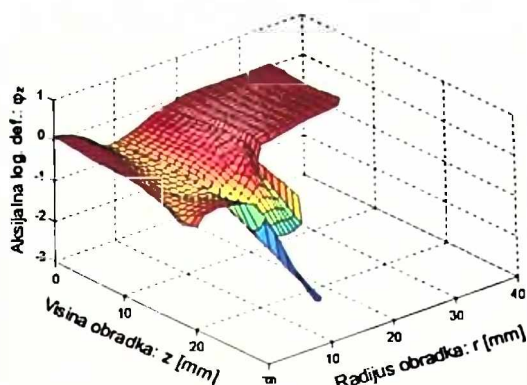
U tačkama eksperimentalnog plana broj 2, 4, 6 i 8, slično kao i kod radijalne logaritamske deformacije, u prvom nivou gornjeg kalupa, za vrijednosti radijusa veće od maksimalne vrijednosti radijusa drugog nivoa dolazi do permanentnog pada vrijednosti aksijalne logaritamske deformacije koje se kreću do: $\varphi_z>-1.5$ (Slika 8.3.). To znači da aksijalna logaritamska deformacija na ovom dijelu opada sa smanjenjem prečnika pripremk i povećanjem prečnika gornjeg kalupa.

Najveće pozitivne vrijednosti aksijalne logaritamske deformacije u blizini ose simetrije po sredini gornjeg kalupa dobijene su u tačkama broj: 11, 12, 15 i 16 i kreću se do: $\varphi_z<0.8$, što znači da ove vrijednosti rastu sa porastom prečnika pripremk i visine drugog nivoa gornjeg kalupa (Slika 8.4.).

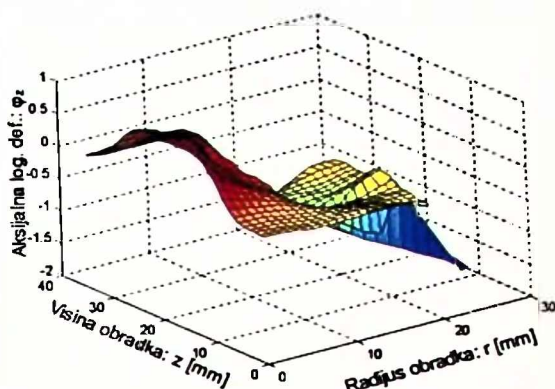
Ekstremna vrijednost obodne logaritamske deformacije u zoni vijenca je za maksimalnu vrijednost radijusa i iznosi: $\varphi_{\theta max}=0.54$ u centralnoj tački plana (Slika 7.9.). U ostalim tačkama plana ona se kreće u rasponu $\varphi_{\theta max}=(0.40 \div 0.67)$. Ova vrijednost raste sa povećanjem prečnika pripremk.

U zoni kalupa vrijednosti obodne logaritamske deformacije su relativno male i kreću se u rasponu: $\varphi_{\theta}=(-0.1 \div 0.2)$. Vrijednosti u zoni donjeg kalupa iznose: $\varphi_{\theta}\sim 0.2$. Najniže vrijednosti su po sredini gornjeg kalupa ispod drugog nivoa i kreću se do: $\varphi_{\theta}>-0.1$. Sa porastom visine na drugom nivou ove vrijednosti rastu do: $\varphi_{\theta}=0.12$ s tim što u blizini ose ostaju negativne. Na

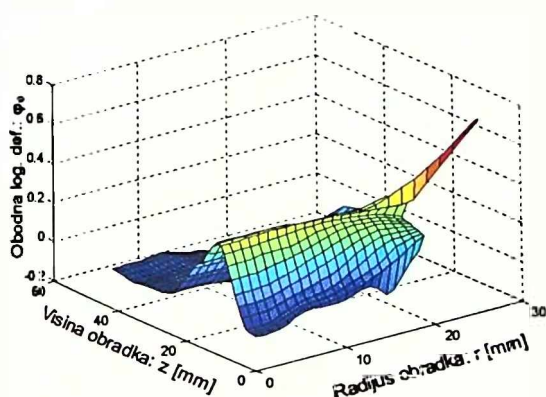
prvom nivou gornjeg kalupa, za vrijednosti radijusa veće od: $r > 10$ [mm] obodni logaritamski stepen deformacije raste i za maksimalnu vrijednost radijusa dostiže približno: $\varphi_\theta = 0.17$.



Slika 8.3. Aksijalna logaritamska deformacija u tački 4 eksperimentalnog plana



Slika 8.4. Aksijalna logaritamska deformacija u tački 11 eksperimentalnog plana



Slika 8.5. Obodna logaritamska deformacija u tački 8 eksperimentalnog plana

Analogna promjena obodne logaritamske deformacije je u tačkama eksperimentalnog plana broj 9 do 16, dok je u tačkama od 1 do 8 kao na Slici 8.5. Najviše vrijednosti u zoni kalupa su dobijene u predjelu podione ravni i iznose približno $\varphi_\theta \sim 0.4$. U dijelu drugog nivoa gornjeg kalupa vrijednosti obodne logaritamske deformacije su bliske nuli.

Smičuća deformacija u centralnoj tački eksperimentalnog plana ima ekstremne vrijednosti po sredini zone vijenca i one iznose: $\gamma_{rz\max} = 0.93$, sa donje strane vijenca i $\gamma_{rz\min} = -1$, sa gornje strane vijenca (Slika 7.10.). U ostalim tačkama eksperimentalnog plana smičuća deformacija

ima ekstremne vrijednosti na istim mjestima i one se kreću u rasponima: $\gamma_{rz\max} = (0.86 \div 1.49)$ i $\gamma_{rz\min} = (-1.54 \div -0.91)$.

U zoni kalupa smičuća deformacija je bliska nuli na dijelu kalupa do polovine prečnika drugog nivoa i u oblasti donjeg kalupa. Najniže vrijednosti su oko vrijednosti koje odgovaraju maksimalnoj vrijednosti radijusa drugog nivoa gornjeg kalupa i iznose do $\gamma_{rz} > -0.43$. Sa porastom radijusa do maksimalne vrijednosti na prvom nivou, smičuća deformacija se približava nuli.

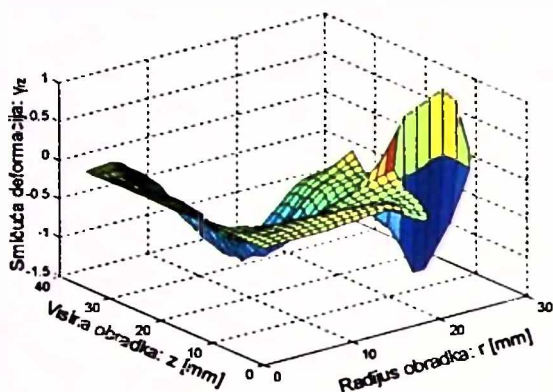
Ovaj trend je prisutan u svim tačkama eksperimentalnog plana, osim u tačkama broj 3, 7, 11 i 15 (Slika 8.6.). U navedenim tačkama je znatno manja širina zone oko ose simetrije u kojoj je smičuća deformacija bliska nuli, a minimalna vrijednost za vrijednost radijusa koji odgovara maksimalnom radijusu drugog nivoa je znatno manja i iznosi približno: $\gamma_{rz} \sim -1.1$.

U centralnoj tački plana broj 18 maksimalna vrijednost efektivne deformacije iznosi: $\varphi_{e\max} = 2.52$ i odgovara maksimalnoj vrijednosti radijusa (Slika 7.11.). U ostalim tačkama ova vrijednost se kreće u rasponu: $\varphi_{e\max} = (1.74 \div 2.55)$.

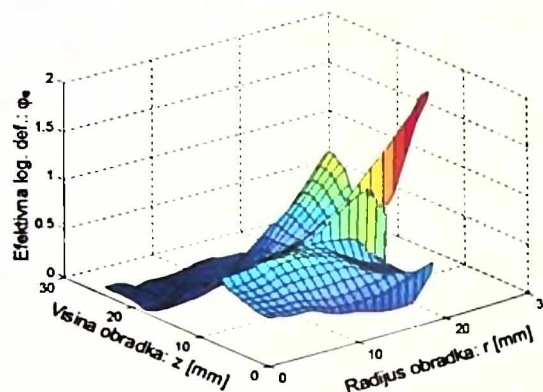
U zoni kalupa efektivna deformacija predstavlja odraz promjene najuticajnijih deformacija, a to su radijalna i aksijalna logaritamska deformacija. Tako je efektivna deformacija u donjem kalupu ujednačena i iznosi približno oko: $\varphi_e \sim 0.3$. Efektivna deformacije neposredno iznad

podione ravni i po sredini gornjeg nivoa je bliska nuli. U gornjem kalupu raste sa porastom radijusa i u predjelu prvog nivoa za vrijednosti radijusa veće od maksimalne vrijednosti radijusa drugog nivoa kreće se do: $\varphi_e < 0.59$.

U ostalim tačkama eksperimentalnog plana karakter promjene efektivne deformacije je sličan osim u tačkama broj: 2, 4, 6 i 8, gdje dolazi do pojave većih vrijednosti efektivne logaritamske deformacije za maksimalne vrijednosti radijusa na prvom nivou gornjeg kalupa. Ove vrijednosti se kreću do $\varphi_e = 1.23$. (Slika 8.7.).



Slika 8.6. Smičuća deformacija u tački 3 eksperimentalnog plana



Slika 8.7. Efektivna deformacija u tački 2 eksperimentalnog plana

8.1.2. Analiza deformacija dobijenih DEFORM simulacijom

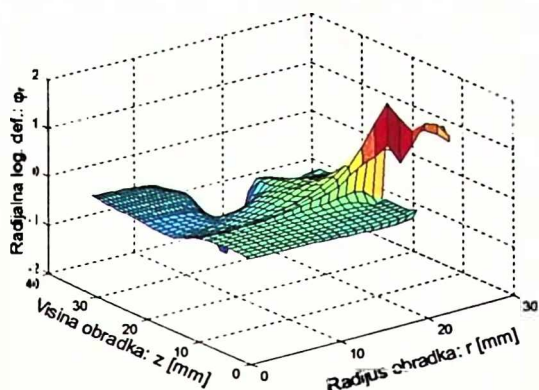
Osjenčeni dijagrami promjene deformacionih parametara dobijeni DEFORM simulacijom (Slika 7.34. do Slika 7.38.) nijesu pogodni za precizniju analizu. Čak ni konturni dijagrami nijesu dovoljno pregledni. Iz tog razloga i zbog analogije sa dijagramima dobijenim MFD, na osnovu dobijenih numeričkih vrijednosti iznijetih iz DEFORM programa, urađeni su 3D dijagrami pomoću MATLAB programskog paketa. Ovakvi dijagrami su pogodniji za sagledavanje karaktera promjene parametara deformacije.

DEFORM simulacija je urađena u svim tačkama eksperimentalnog plana i dobijeni su 3D dijagrami promjene svih parametara po presjeku obradka u meridijalnoj ravni. Navedeni su primjeri svih deformacionih parametara u centralnoj tački plana eksperimenta (Slika 8.8. do Slike 8.12.).

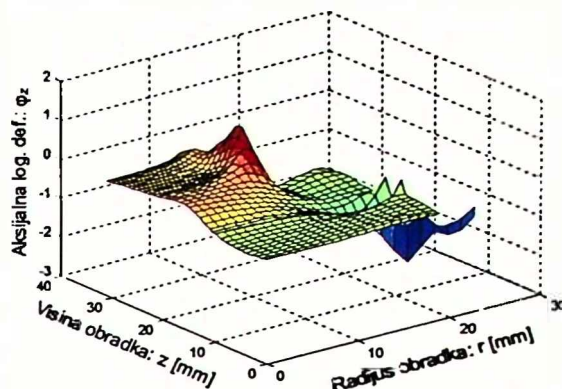
Na osnovu dijagrama promjene parametara deformacije dobijenih DEFORM simulacijom u centralnoj tački plana eksperimenta može se konstatovati da postoje jasno izražene dvije zone, slično kao kod parametara dobijenih MFD. To su zona kalupa i zona vijenca.

U zoni vijenca javlja se najveća vrijednost radijalne logaritamske deformacije i u centralnoj tački plana ona iznosi: $\varphi_{rmax} = 1.89$. U ostalim tačkama eksperimentalnog plana maksimalna vrijednost se kreće u rasponu: $\varphi_{rmax} = (1.19 \div 2.10)$. Primjetno je da se maksimalna vrijednost radijalne logaritamske deformacije dobija na približno prvoj četvrtini vijenca

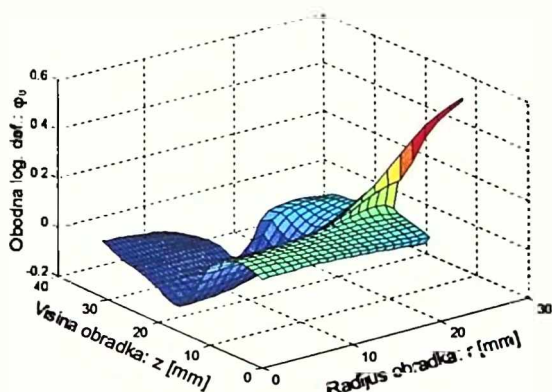
Najniža vrijednost radijalne logaritamske deformacije se dobija u početnoj zoni visine drugog nivoa gornjeg kalupa za maksimalnu vrijednost radijusa i iznosi: $\varphi_{rmin} = -1.2$, u centralnoj tački plana. U ostalim tačkama kreće se u rasponu: $\varphi_{rmin} = -(1.47 \div 0.31)$.



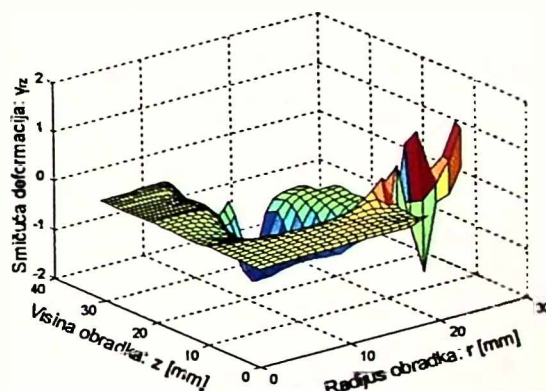
Slika 8.8. 3D dijagram radijalne logaritamske deformacije φ_r u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom



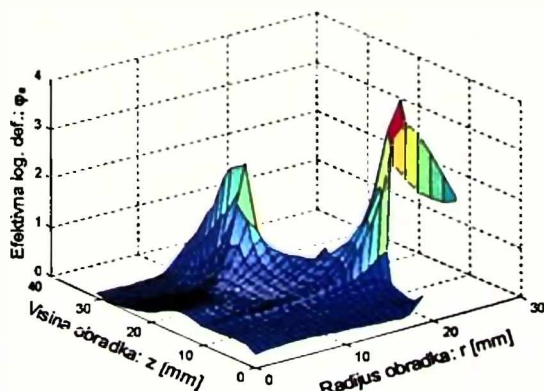
Slika 8.9. 3D dijagram aksijalne logaritamske deformacije φ_z u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom



Slika 8.10. 3D dijagram obodne logaritamske deformacije φ_θ u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom



Slika 8.11. 3D dijagram smičuće deformacije γ_{rz} u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom



Slika 8.12. 3D dijagram efektivne logaritamske deformacije φ_e u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom

vrijednost se dobija na kraju vijenca, tj. za $\varphi_{\theta \max}=0.53$ u centralnoj tački plana, a u ostalim tačkama se kreće u rasponu: $\varphi_{\theta \max}=(0.24 \div 0.68)$.

Ekstremne vrijednosti aksijalne logaritamske deformacije su dobijene na identičnim mjestima presjeka kao kod radijalne. Minimalna vrijednost u centralnoj tački plana je u zoni vijenca i iznosi: $\varphi_{z \min}=-2.27$, a u ostalim tačkama kreće se u rasponu: $\varphi_{z \min}=-(2.52 \div 1.24)$. Maksimalna vrijednost aksijalne logaritamske deformacije u zoni kalupa u centralnoj tački plana iznosi: $\varphi_{z \max}=1.24$, dok u ostalim tačkama kreće se u rasponu: $\varphi_{z \max}=(0.23 \div 1.62)$.

Dijagram obodne logaritamske deformacije dobijen DEFORM simulacijom je po karakteru promjene sličan odgovarajućem dijagramu dobijenom MFD. Maksimalna maksimalnu vrijednost radijusa i ona iznosi:

Smičuća deformacija dobijena DEFORM simulacijom se karakteriše nedefinisanim promjenom u zoni vijenca u svim tačkama eksperimentalnog plana. Glavnu karakteristiku predstavlja minimalna vrijednost neposredno ispod prelaza između prvog i drugog nivoa gornjeg kalupa za maksimalnu vrijednost radijusa drugog nivoa. U centralnoj tački plana ova vrijednost iznosi: $\gamma_{rzmin} = -1.66$, a u ostalim tačkama kreće se u rasponu: $\gamma_{rzmin} = -(2.43 \div 1.14)$. U ostalom dijelu kalupa karakter promjene je identičan kao kod smičuće deformacije dobijene MFD.

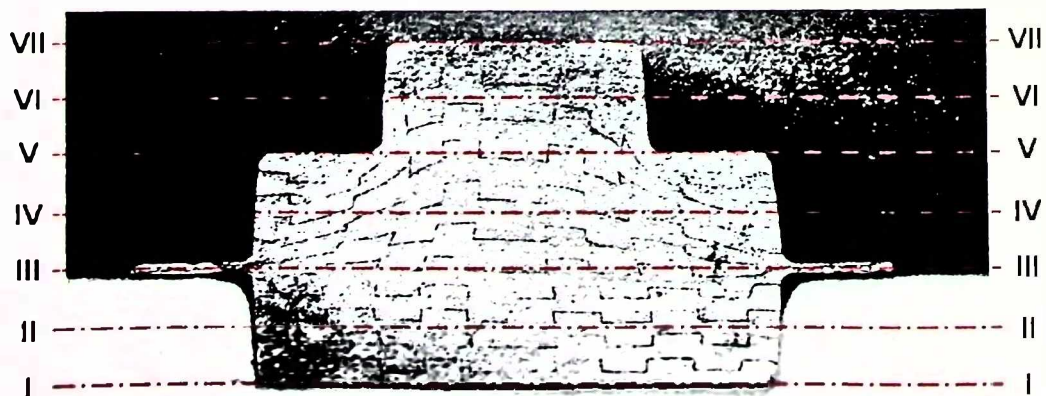
Oblik dijagrama efektivne deformacije dobijen DEFORM simulacijom, definišu najuticajnije logaritamske deformacije, u prvom redu radijalna i aksijalna. Maksimalna vrijednost je u početnoj zoni vijenca i iznosi: $\varphi_{emax} = 3.09$, a u ostalim tačkama plana ova vrijednost se kreće u rasponu: $\varphi_{emax} = (1.81 \div 3.64)$. U dijelu kalupa, maksimalna vrijednost je kao i kod radijalne i aksijalne deformacije, neposredno ispod prelaza prvog i drugog nivoa za maksimalnu vrijednost radijusa drugog nivoa. U centralnoj tački plana ova vrijednost iznosi: $\varphi_e = 2.69$,

a u ostalim tačkama kreće se u rasponu $\varphi_e = (0.94 \div 3.72)$. Na preostalom dijelu kalupa karakter promjene efektivne logaritamske deformacije je sličan kao i kod iste dobijene MFD.

8.1.3. Poređenje deformacija

3D dijagrami promjene deformacija su dobri za vizuelno sagledavanje karaktera promjene, ali nijesu pogodni za kvantitativnu analizu rezultata. U tu svrhu su urađeni 2D dijagrami u pojedinim karakterističnim presjecima meridijalne ravni obradka. Navedeni presjeci dati su na Slici 8.13. U skladu sa usvojenim geometrijskim parametrima kalupa (Slika 4.1.), usvojenim koordinatnim sistemom (Slika 4.18) i vrijednostima ulaznih faktora na nivoima varijacije eksperimentalnog plana (Tabela 4.2) presjeci su usvojeni tako da u centralnoj tački plana:

- Presjek I-I odgovara donjoj strani obradka, odnosno dnu donjeg kalupa: $z=0$,
- Presjek II-II odgovara sredini donjeg kalupa: $z=H_0/2=5$ [mm],
- Presjek III-III odgovara podionoj ravni obradka: $z=H_0+h_v/2=10.5$ [mm],
- Presjek IV-IV odgovara sredini gornjeg kalupa: $z=H_0+h_v+H_1/2=16$ [mm],
- Presjek V-V odgovara maksimalnoj visini prvog nivoa gornjeg kalupa: $z=H_0+h_v+H_1=21$ [mm],
- Presjek VI-VI odgovara sredini drugog nivoa gornjeg kalupa: $z=H_0+h_v+H_1+H_2/2=26$ [mm],
- Presjek VII-VII odgovara maksimalnoj visini obradka: $z=H_0+h_v+H_1+H_2/2=31$ [mm].



Slika 8.13. Karakteristični presjeci u meridijalnoj ravni obradka

U svim karakterističnim presjecima u meridijalnoj ravni obradka u centralnoj tački eksperimentalnog plana (Tabela 4.1.) dati su dijagrami na kojima su predstavljeni svi parametri deformacija dobijeni MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem (Slika 8.14. do Slika 8.18). Analizom navedenih dijagrama se zaključuje da postoje manje ili veće razlike u vrijednostima ili karakteru promjene parametara deformacije dobijenih na različite načine.

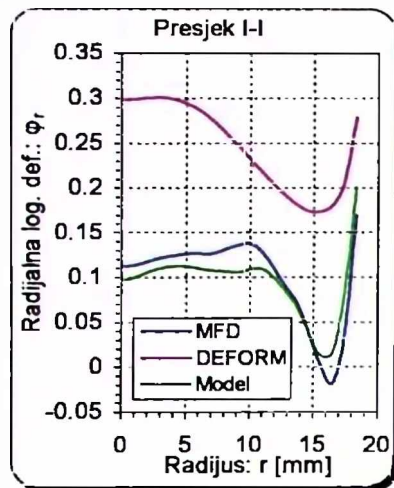
U presjeku I-I radijalna logaritamska deformacija dobijena MFD i DEFORM simulacijom ima sličan karakter promjene u funkciji radijusa ali se razlikuje u vrijednostima pri čemu su u pitanju niže vrijednosti: $\varphi_r < 0.3$. U presjeku II-II ovaj trend je zadržan za majne vrijednosti radijusa, dok se sa porastom radijusa razlika smanjuje, da bi se za maksimalni radijus vrijednosti poklopile. U presjeku III-III podione ravni vrijednosti radijalne logaritamske deformacije se poklapaju za oblast radijusa koja odgovara unutrašnjem dijelu kalupa. Za oblast radijusa koja odgovara zoni vijenca, vrijednosti odstupaju, pri čemu se kod MFD javlja konstantan rast, a kod DEFORM simulacije postoji maksimum. Ovaj maksimum je posljedica ponašanja koje je opisano u Tački 8.1.2. U presjeku IV-IV radijalne logaritamske deformacije se razlikuju i po karakteru promjene i po vrijednostima, dok u presjeku V-V odstupanja postoje, ali je karakter promjene sličan sve do maksimalne vrijednosti radijusa, gdje dolazi do naglog pada kod vrijednosti dobijenih DEFORM simulacijom. U presjeku VI-VI dobro je poklapanje vrijednosti sve do maksimalnog radijusa kada, takođe, dolazi do pada vrijednosti dobijenih DEFORM simulacijom. Za presjek VII-VII može se reći da postoji dobro poklapanje jer su u pitanju niže vrijednosti radijalne logaritamske deformacije.

Kada je u pitanju aksijalna logaritamska deformacija može se napraviti analogno poređenje kao i kod radijalne, stim što su u presjeku I-I do III-III nešto veća odstupanja. U zoni vijenca presjeku III-III je zastupljen minimum funkcije, a u presjeku V-V i VI-VI dolazi do naglog rasta aksijalne logaritamske deformacije za vrijednosti radijusa koje su bliske maksimalnom.

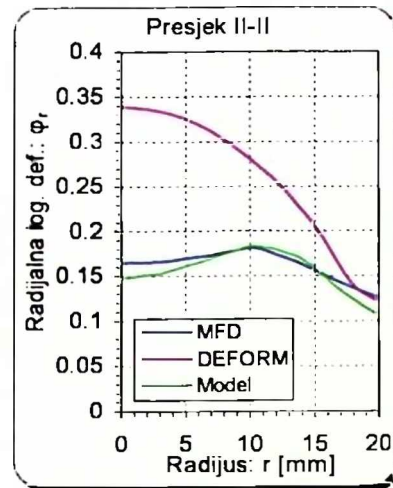
Kod obodne logaritamske deformacije odstupanja su približno iste veličine kao i kod radijalne logaritamske deformacije za presjeke I-I i II-II, stim što je nešto viša razlika za maksimalnu vrijednost radijusa. U presjeku III-III identičan je karakter promjene za sve vrijednosti radijusa i u zoni klaupa i vijenca, a razlike se smanjuju sa porastom radijusa. U presjeku IV-IV je veća sličnost karaktera promjene. U presjecima VI-VI i VII-VII karakter promjene je različit, ali su u pitanju male vrijednosti obodne logaritamske deformacije pa odstupanja nijesu velika.

Promjene smičućih deformacija dobijenih MFD i DEFORM simulacijom u presjeku I-I i II-II se karakteriše manjim međusobnim odstupanjima jer su u pitanju niže vrijednosti. U presjeku III-III odstupanje raste do srednjih vrijednosti, dok je karakter promjene sličan na najvišem dijelu vrijednosti radijusa. U zadnjem dijelu zone vijenca dolazi do pada smičuće deformacije dobijene DEFORM simulacijom. Najveće odstupanje smičućih deformacija je u presjecima IV-IV i V-V za vrijednosti radijusa veće od maksimalnog radijusa na drugom nivou. U presjecima VI-VI i VII-VII može se reći da je najbolje poklapanje smičućih deformacija.

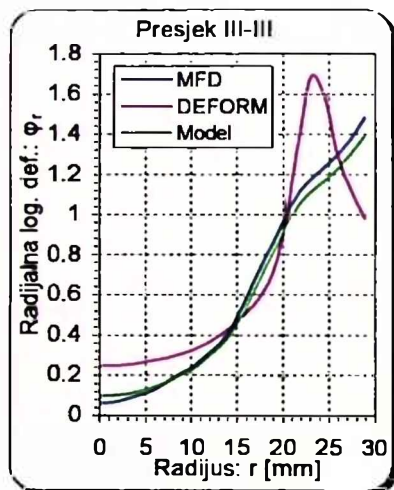
Analiza efektivne logaritamske deformacije je, kao što je već rečeno, analogna najuticajnijim deformacijama, a to su radijalna i aksijalna logaritamska deformacija, pa se iz tog razloga analiza sprovedena za odstupanje radijalnih i aksijalnih deformacija, može primijeniti i na efektivnu logaritamsku deformaciju.



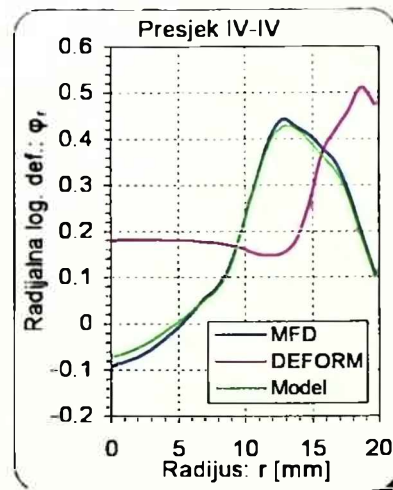
a)



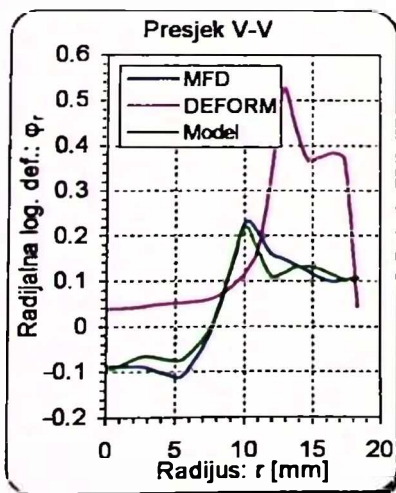
b)



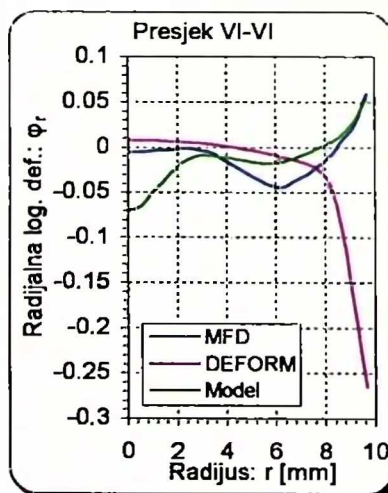
c)



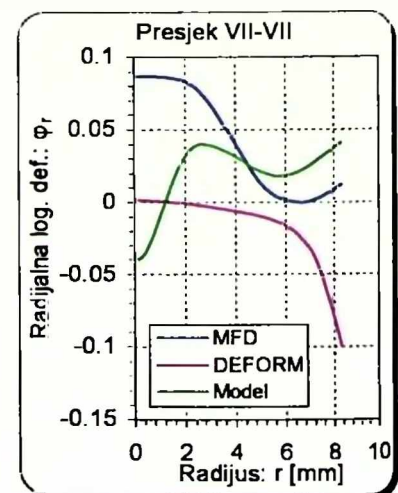
d)



e)

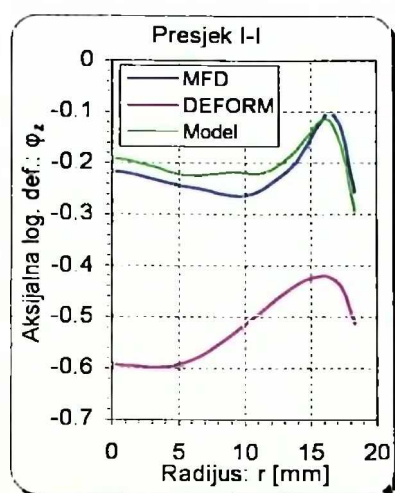


f)

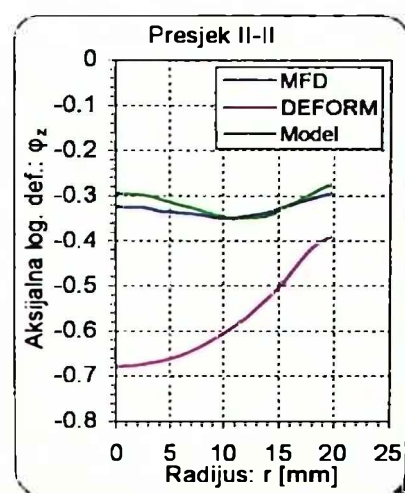


g)

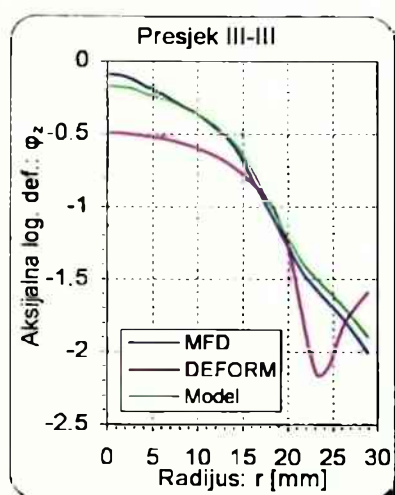
Slika 8.14. Radijalna logaritamska deformacija φ_r u centralnoj tački plana broj 18, dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII



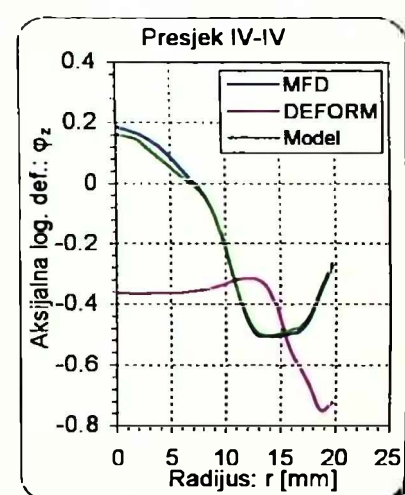
a)



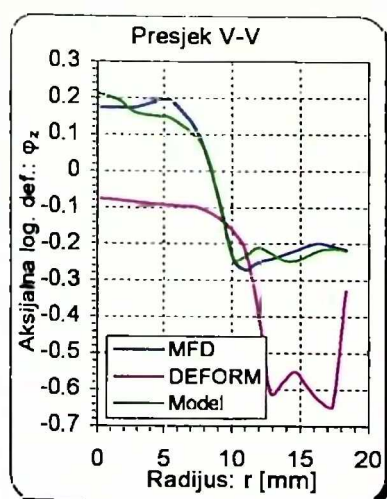
b)



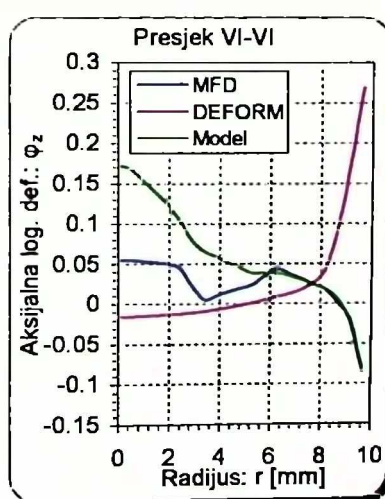
c)



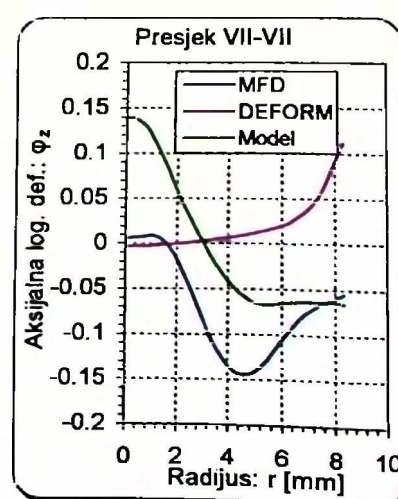
d)



e)

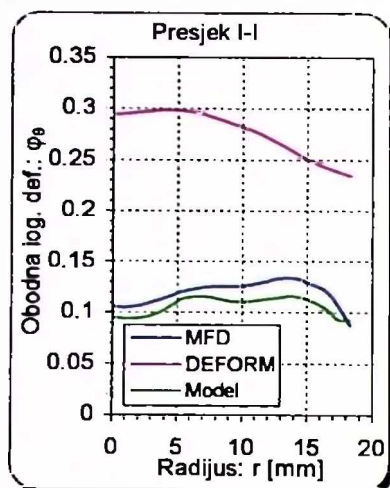


f)

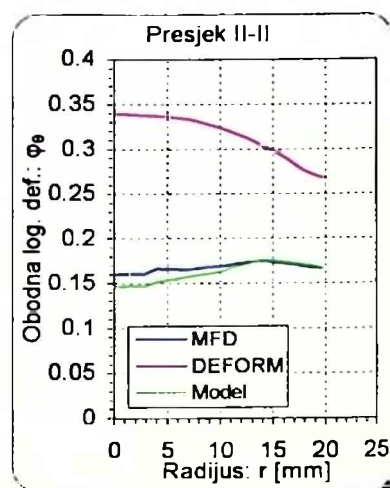


g)

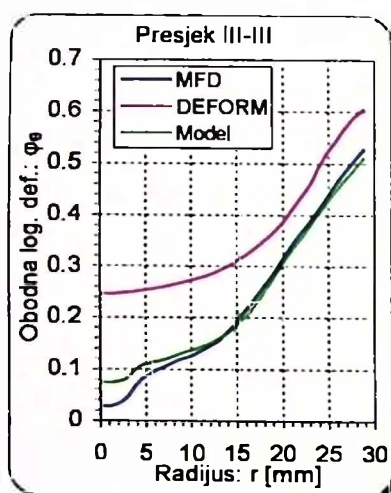
Slika 8.15. Aksijalna logaritamska deformacija φ_z u centralnoj tački plana broj 18, dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII



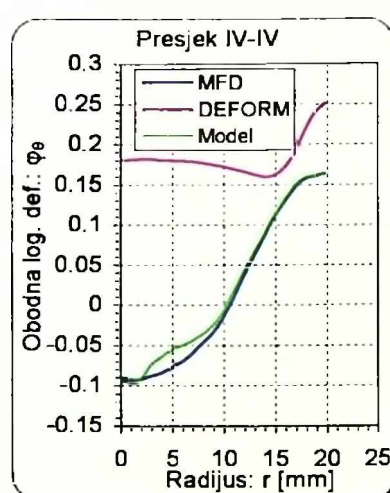
a)



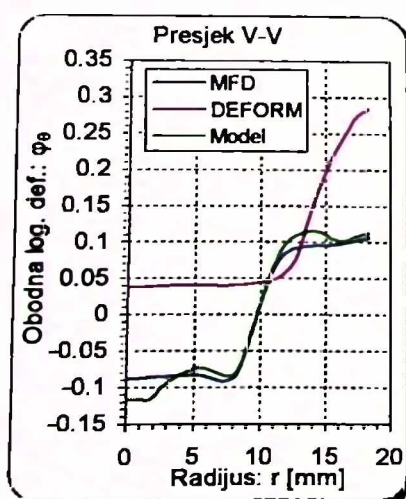
b)



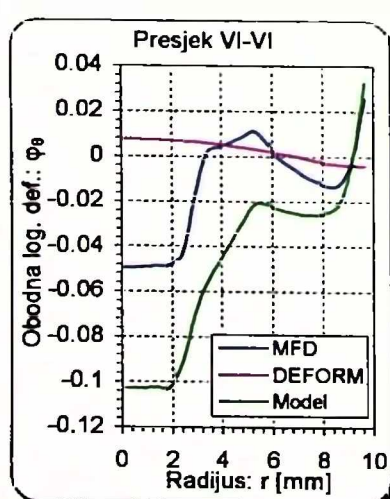
c)



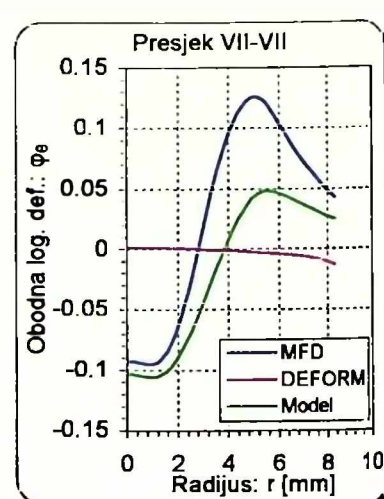
d)



e)

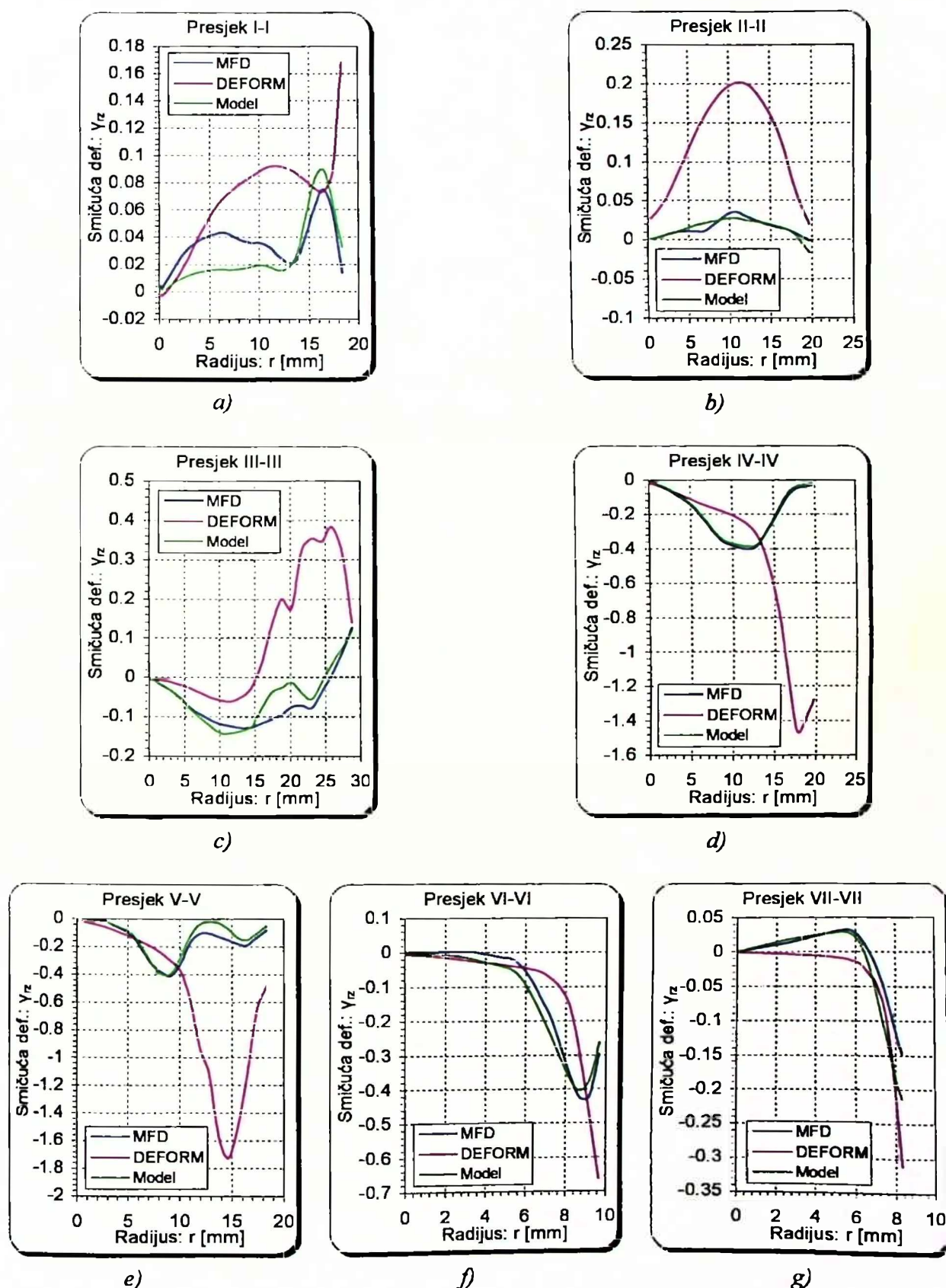


f)

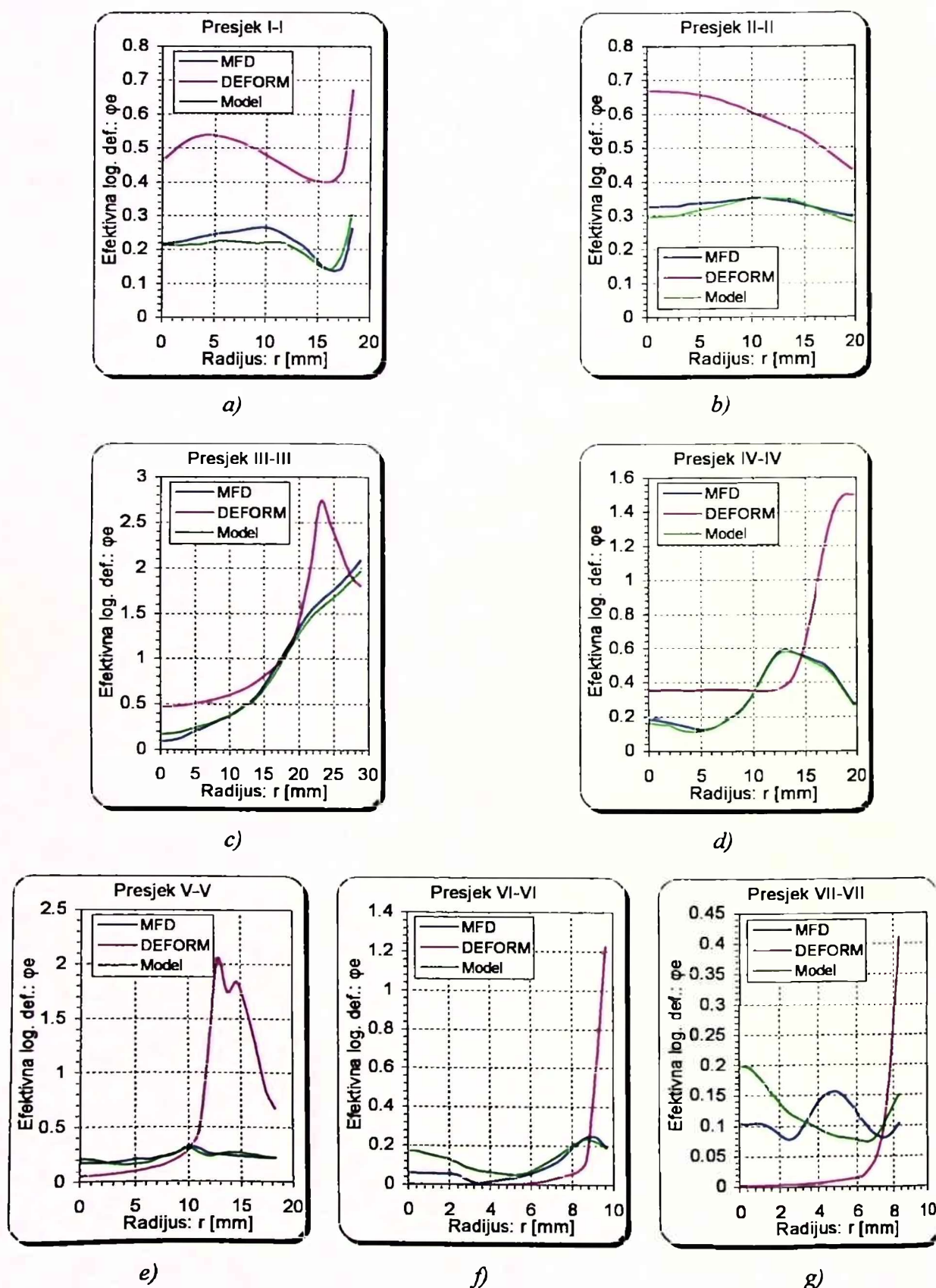


g)

Slika 8.16. Obodna logaritamska deformacija φ_θ u centralnoj tački plana broj 18, dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII



Slika 8.17. Smičuća deformacija γ_{rz} u centralnoj tački plana broj 18, dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII



Slika 8.18. Efektivna logaritamska deformacija ϕ_e u centralnoj tački plana broj 18, dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII

8.2. ANALIZA BRZINA DEFORMACIJA

Kao i kod analize deformacija, uticaj faktora temperature na brzine deformacije je zanemarljiv u rasponu temperatura tople obrade legure aluminijua AlMgSi0,5: $t=(420\div 440)[^{\circ}\text{C}]$. Brzine deformacija su određene variranjem četiri ulazna faktora, i to: tri geometrijska faktora kalupa i faktora dimenzija priprema. Kao tipski slučaj za analizu uzeta je centralna tačka plana broj 18 u kojoj su 3D dijagrami brzina deformacija dati na Slici 7.16. do Slike 7.20., a odstupanja promjene komponenata brzina deformacija u ostalim tačkama od tipskog slučaja, data su kroz konkretne primjere.

8.2.1. Analiza brzina deformacija dobijenih MFD

Analizom radijalne brzine deformacije dobijene MFD date na Slici 7.16. zaključuje se da je njena maksimalna vrijednost u centralnoj tački plana na kraju vijenca, tj. za maksimalnu vrijednost radijusa i iznosi: $\dot{\epsilon}_{r\max}=8.71[\text{s}^{-1}]$. I u ostalim tačkama eksperimentalnog plana je identično stanje, a maksimalna vrijednost radijalne brzine deformacije se kreće u rasponu: $\dot{\epsilon}_{r\max}=(3.44\div 8.71)[\text{s}^{-1}]$.

Vrijednost radijalne brzine deformacije u zoni kalupa, ako se izuzme dio kalupa u blizini vijenca, je mnogo manja u odnosu na maksimalnu vrijednost i kreće se u rasponu: $\dot{\epsilon}_r=(-0.5\div 0.5)[\text{s}^{-1}]$. Po karakteru promjene je slična promjeni radijalne logaritamske deformacije.

Aksijalna brzina deformacije se kreće u rasponu znatno nižih apsolutnih vrijednosti od maksimalne vrijednosti radijalne brzine deformacije (Slika 7.17.). U zoni vijenca ekstremna - minimalna vrijednost je na polovini vijenca i u centralnoj tački plana broj 18 iznosi: $\dot{\epsilon}_{z\min}=-0.24[\text{s}^{-1}]$. U ostalim tačkama minimalna vrijednost u zoni vijenca kreće se u rasponu: $\dot{\epsilon}_{z\min}=-(0.29\div 0.11)[\text{s}^{-1}]$.

Aksijalna brzina deformacije u kalupu ima sličan karakter u svim tačkama eksperimentalnog plana kao i u centralnoj tački. Uočava se da je maksimalna vrijednost u kalupu dobijena u oblasti sredine kalupa na osi simetrije i iznosi: $\dot{\epsilon}_{z\max}=0.52[\text{s}^{-1}]$. U ostalim tačkama kreće se u rasponu: $\dot{\epsilon}_{z\max}=(0.25\div 1.82)[\text{s}^{-1}]$. Vrijednosti maksimalne aksijalne deformacije su više za veći radijus priprema. Najviše vrijednosti su dobijene u tačkama sa donjim nivoom faktora x_1 i x_3 i sa gornjim nivoom faktora x_2 .

Kod obodne logaritamske deformacije maksimalna vrijednost se dobija za maksimalnu vrijednost radijusa na kraju vijenca i iznosi: $\dot{\epsilon}_{\theta\max}=0.49[\text{s}^{-1}]$ (Slika 7.18.). U ostalim tačkama plana eksperimenta ova vrijednost se kreće u rasponu: $\dot{\epsilon}_{\theta\max}=(0.37\div 0.72)[\text{s}^{-1}]$. Niže vrijednosti su dobijene za viši prečnik priprema. Najviše vrijednosti su dobijene u tačkama sa gornjim nivoom faktora x_1 i donjim nivoom faktora x_2 .

Što se tiče zone kalupa, obodna brzina deformacije je ujednačena po obodu kalupa i ima niske vrijednosti: $\dot{\epsilon}_{\theta}<0.1[\text{s}^{-1}]$. U dijelu prvog nivoa gornjeg kalupa, ispod drugog nivoa gornjeg kalupa, ova brzina deformacije ima negativne vrijednosti i dostiže minimum na osi, koji u centralnoj tački iznosi: $\dot{\epsilon}_{\theta\min}=-0.2[\text{s}^{-1}]$. U ostalim tačkama kreće se u rasponu vrijednosti: $\dot{\epsilon}_{\theta\min}=-(0.41\div 0.04)[\text{s}^{-1}]$. Najviše vrijednosti su dobijene za tačke plana sa gornjim nivoom faktora x_2 i donjim nivoom faktora x_3 .

Smičuća brzina deformacije ima sličan karakter promjene kao smičuća deformacija. Ekstremne vrijednosti dobijene su po sredini radijusa vijenca (Slika 7.19.). Sa donje strane vijenca je maksimalna vrijednost smičuće brzine deformacije i u centralnoj tački plana iznosi

$\dot{\gamma}_{rzmax}=0.74[s^{-1}]$, a sa gornje strane je minimalna vrijednosti i iznosi: $\dot{\gamma}_{rzmin}=-0.99[s^{-1}]$. U ostalim tačkama ekstremne vrijednosti u vijencu se kreću u rasponima: $\dot{\gamma}_{rzmax}=(0.35\div 1.39)[s^{-1}]$ i $\dot{\gamma}_{rzmin}=-(1.48\div 0.34)[s^{-1}]$.

U najvećem dijelu kalupa vrijednost smičuće brzine deformacije je ujednačena i bliska nuli. Na dijelu vrijednosti radijusa bliskim maksimalnim u drugom nivou gornjeg kalupa i neposredno ispod tih vrijednosti je zona negativne smičuće brzine deformacije. U ovoj zoni je i minimum koji u centralnoj tački iznosi: $\dot{\gamma}_{rzmin}=-0.3[s^{-1}]$. U ostalim tačkama ova vrijednost se kreće u rasponu: $\dot{\gamma}_{rzmin}=-(1.1\div 0.0)[s^{-1}]$. Ove vrijednosti su više za tačke eksperimentalnog plana sa gornjim nivoom faktora x_2 .

Efektivna brzina deformacije ima nagli porast u funkciji radijusa u zoni vijenca i dostiže najvišu vrijednost za maksimalnu vrijednost radijusa, tj. na kraju vijenca i iznosi: $\dot{\epsilon}_{emax}=5.71[s^{-1}]$ (Slika 7.20.). U ostalim tačkama maksimalna vrijednost efektivne brzine deformacije se kreće u rasponu: $\dot{\epsilon}_{emax}=(2.27\div 5.71)[s^{-1}]$.

U zoni kalupa vrijednosti su mnogo manje i kreću se do $\dot{\epsilon}_e<1[s^{-1}]$. Međutim, na karakter promjene efektivne brzine deformacije, pored radijalne deformacije imaju prepoznatljiv uticaj i aksijalna i obodna brzina deformacije, pa je primijetan njen porast na dijelu prvog nivoa gornjeg kalupa ispod drugog nivoa. Na tom dijelu maksimalna vrijednost se dobija na osi obradka i ona iznosi $\dot{\epsilon}_e=0.48[s^{-1}]$ u centralnoj tački plana broj 18. U ostalim tačkama kreću se u rasponu: $\dot{\epsilon}_e=(0.08\div 1.38)[s^{-1}]$. Kako na veličinu ove vrijednosti najveći uticaj ima aksijalna brzina deformacije, analogan je uticaj faktora. Ova vrijednost je veća za donji nivo faktora x_4 , tj. opada sa smanjenjem radijusa. Najviše vrijednosti su dobijene za donji nivo faktora x_1 i gornji nivo faktora x_2 , pri čemu su više za donji nivo faktora x_3 .

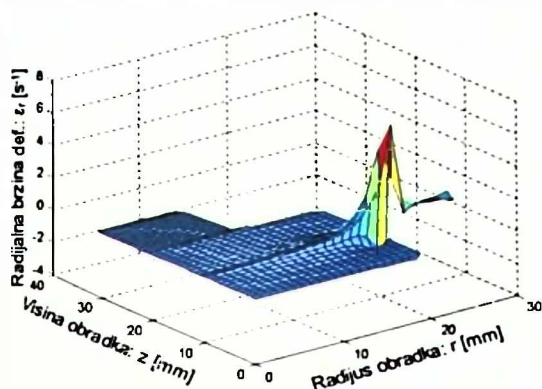
8.2.2. Analiza brzina deformacija dobijenih DEFORM simulacijom

Zbog konstatacije, kao kod analize deformacija, da osjenčeni dijagrami promjene brzina deformacija dobijeni DEFORM simulacijom (Slika 7.40. do Slika 7.44.) nijesu pogodni za analizu istih, na osnovu dobijenih numeričkih vrijednosti iznijetih iz DEFORM softverskog paketa, urađeni su 3D dijagrami u MATLAB-u. Ovakvi dijagrami su pogodniji za sagledavanje karaktera promjene brzina deformacija.

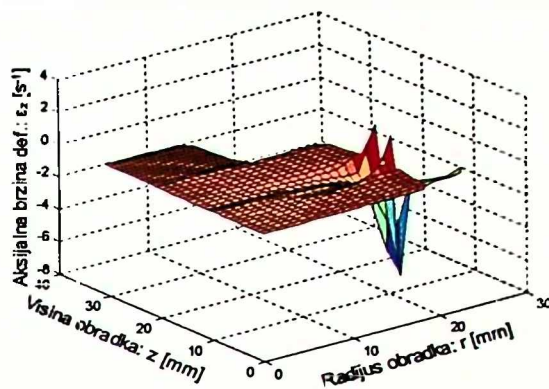
DEFORM simulacija je urađena u svim tačkama eksperimentalnog plana i kao primjer, daju se dobijeni 3D dijagrami promjene svih komponenata brzina deformacija u meridijalnoj ravni obradka, u centralnoj tački plana eksperimenta broj 18 (Slika 8.19. do Slike 8.23.).

Radijalna brzina deformacije dobijena DEFORM simulacijom ima jasno izraženu maksimalnu vrijednost u zoni vijenca koja se nalazi za vrijednost radijusa koja odgovara približno prvoj četvrtini vijenca i ona iznosi: $\dot{\epsilon}_{rmax}=6.45[s^{-1}]$ u centralnoj tački plana eksperimenta. Ova vrijednost pada na polovini vijenca na: $\dot{\epsilon}_r\sim 1[s^{-1}]$ i ostaje približno konstantna do kraja vijenca. Maksimalna vrijednost radijalne brzine deformacije u ostalim tačkama eksperimentalnog plana se kreće u rasponu: $\dot{\epsilon}_{rmax}=(2.17\div 9.90)[s^{-1}]$, dok konstantni dio iznosi približno: $\dot{\epsilon}_r\sim 1[s^{-1}]$.

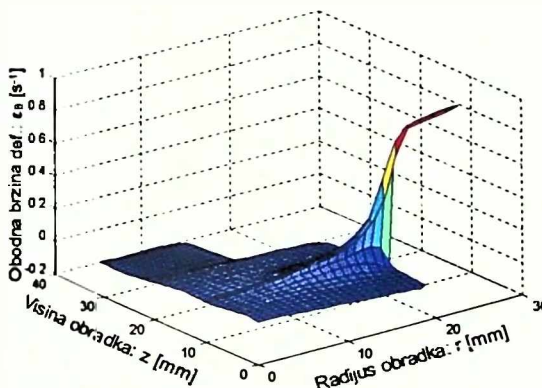
U zoni kalupa može se reći da je vrijednost radijalne brzine deformacije mala i ako se izuzme dio u neposrednoj blizini vijenca gdje ona prelazi u intenzivni rast, kreće se do: $\dot{\epsilon}_r<0.5[s^{-1}]$. Na mjestu prelaza iz kalupa u vijenac nalaze se minimalne vrijednosti koje se kreću oko: $\dot{\epsilon}_r\sim 2[s^{-1}]$.



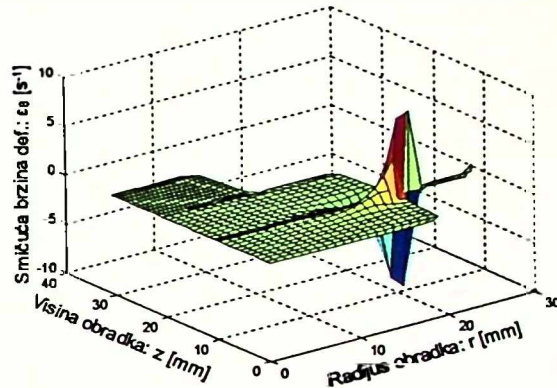
Slika 8.19. 3D dijagram radijalne brzine deformacije $\dot{\epsilon}_r$ [s^{-1}] u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom



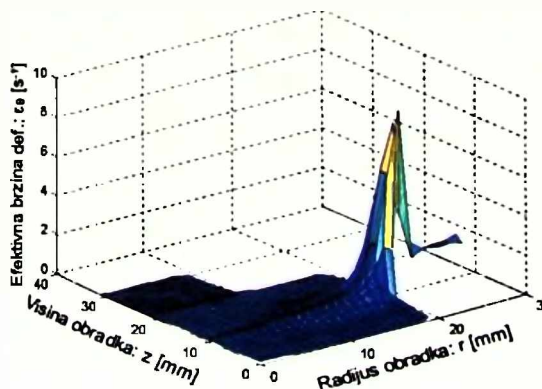
Slika 8.20. 3D dijagram aksijalne brzine deformacije $\dot{\epsilon}_z$ [s^{-1}] u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom



Slika 8.21. 3D dijagram obodne brzine deformacije $\dot{\epsilon}_\theta$ [s^{-1}] u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom

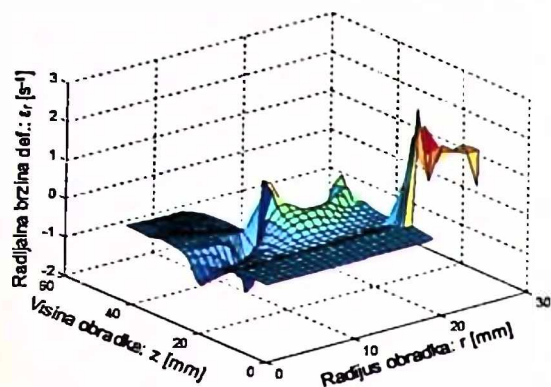


Slika 8.22. 3D dijagram smičuće brzine deformacije $\dot{\gamma}_{rz}$ [s^{-1}] u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom



Slika 8.23. 3D dijagram efektivne brzine deformacije $\dot{\epsilon}_e$ [s^{-1}] u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom

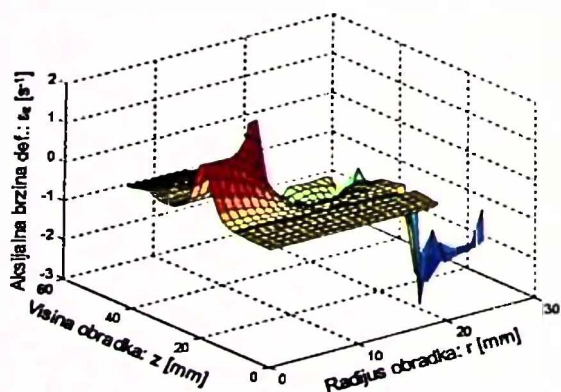
Navedeno važi za sve tačke eksperimentalnog plana osim za tačke broj: 7, 11, 12, 15 i 16. U pitanju su tačke u kojima materijal ne popunjava čitavu unutrašnjost kalupa (Prilog P.4.). U navedenim tačkama 3D dijagram promjene radijalne brzine deformacije ima tipski oblik dat na primjeru tačke eksperimentalnog plana broj 7 na Slici 8.24. Maksimalne vrijednosti u ovim tačkama se kreću u rasponu: $\dot{\epsilon}_{r\max} = (2.17 \div 2.95)[s^{-1}]$, a u dijelu kalupa postoje izražene ekstremne vrijednosti. Ove vrijednosti se nalaze pri vrhu drugog nivoa gornjeg kalupa. Minimalna vrijednost radijalne brzine deformacije je neposredno prije maksimalne vrijednosti radijusa drugog nivoa, a maksimalna poslije. Naglašeni pad radijalne brzine deformacije se prostire sve do ose na kojoj je minimum po sredini prvog nivoa gornjeg kalupa. Takođe, lokalni maksimum postoji i za maksimalne vrijednosti radijusa i visine prvog nivoa gornjeg kalupa i kreće se u rasponu: $\dot{\epsilon}_{r\max} = (1.02 \div 1.67)[s^{-1}]$.



Slika 8.24. 3D dijagram radijalne brzine deformacije u tački eksperimentalnog plana broj 7, dobijen DEFORM simulacijom

aksijalne brzine deformacije i kreću se u rasponu: $\dot{\epsilon}_z = (2 \div 3.5)[s^{-1}]$.

Analogno, kao i kod radijalne brzine deformacije, u tačkama eksperimentalnog plana u kojima materijal ne popunjava čitavu unutrašnjost kalupa, dijagram aksijalne brzine deformacije je drugačijeg tipa. To su tačke broj 7, 11, 12, 15 i 16 (Prilog P.4.), a kao primjer daje se aksijalna brzina deformacije u tački eksperimentalnog plana broj 7 (Slika 8.25.). U ovim tačkama minimalne vrijednosti u zoni vijenca kreću se u rasponu: $\dot{\epsilon}_{zmin} = -(2.30 \div 2.23)[s^{-1}]$. Maksimalne vrijednosti u kalupu su u blizini maksimalne visine prvog nivoa gornjeg kalupa, neposredno prije maksimalne vrijednosti radijusa drugog nivoa i kreću se u rasponu: $\dot{\epsilon}_z = (0.92 \div 1.90)[s^{-1}]$, a minimalne vrijednosti su poslije maksimalne vrijednosti radijusa drugog nivoa i kreću se u rasponu: $\dot{\epsilon}_{zmin} = -(1.47 \div 0.87)[s^{-1}]$. Porast aksijalne brzine deformacije se prostire od navedenog maksimuma do ose simetrije gdje ima maksimum na polovini drugog nivoa gornjeg kalupa.



Slika 8.25. 3D dijagram aksijalne brzine deformacije u tački eksperimentalnog plana broj 7, dobijen DEFORM simulacijom

maksimum na osi simetrije i on se kreće u rasponu: $\dot{\epsilon}_{\theta max} = (0.06 \div 0.11)[s^{-1}]$ Više vrijednosti ovog maksimuma su karakteristične za donji nivo faktora x_1 .

U tačkama plana eksperimenta broj 7, 11, 12, 15 i 16 (Prilog P.4.), gdje materijal u potpunosti ne popunjava kalup dijagram obodne brzine deformacije je tipa datog na primjeru eksperimentalne tačke broj 7 na Slici 8.26. Minimalna vrijednost na kraju zone vijenca se kreće u

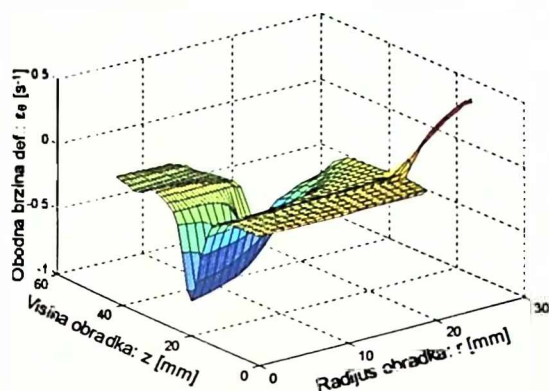
Aksijalna brzina deformacije predstavlja sličnu funkciju radijalnoj brzini deformacije. Minimalna vrijednost u centralnoj tački plana je: $\dot{\epsilon}_{zmin} = 7.08[s^{-1}]$, a približno konstantna vrijednost na kraju vijenca iznosi: $\dot{\epsilon}_z = 1.9[s^{-1}]$. Minimalna vrijednost u ostalim tačkama plana se kreće u rasponu: $\dot{\epsilon}_{zmin} = -(10.56 \div 2.23)[s^{-1}]$.

U zoni kalupa vrijednost aksijalne brzine deformacije je veoma bliska nuli osim na mjestu prelaza vijenca u kalup gdje počinje intenzivan pad vrijednosti i u blizini prelaza prvog nivoa u drugi za maksimalnu vrijednost radijusa drugog nivoa gornjeg kalupa gdje pada do $\dot{\epsilon}_z = 0.47[s^{-1}]$. Na mjestima prelaza kalupa u vijenac postoje maksimumi vrijednosti

Obodna brzina deformacije ima intenzivan porast u zoni vijenca i dostiže maksimum na kraju vijenca. Centralnoj tački plana broj 18 maksimalna vrijednost iznosi: $\dot{\epsilon}_{\theta max} = 0.84[s^{-1}]$, dok se u ostalim tačkama eksperimentalnog plana kreće u rasponu: $\dot{\epsilon}_{\theta max} = (0.46 \div 0.96)[s^{-1}]$.

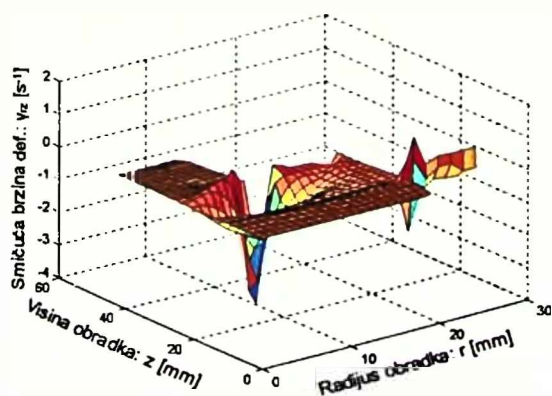
U dijelu kalupa vrijednosti su male i bliske nuli, osim u predjelu podione ravni gdje počinju sa rastom poslije maksimalnog radijusa drugog nivoa gornjeg kalupa. U dijelu kalupa od prelaza između prvog i drugog nivoa gornjeg kalupa za maksimalnu vrijednost radijusa drugog nivoa, pa do ose simetrije, nešto su naglašenije vrijednosti obodne brzine deformacije i na tom dijelu dostižu lokalni

rasponu: $\dot{\epsilon}_{\theta \min} = (0.46 \div 0.56)[s^{-1}]$. Na dijelu kalupa od prelaza iz prvog u drugi nivo za maksimalnu vrijednost radijusa drugog nivoa gornjeg kalupa do ose simetrije, u navedenim tačkama primjetan je porast vrijednosti obodne brzine deformacije i on dostiže lokalni minimum na osi simetrije. Ovaj minimum se kreće u rasponu: $\dot{\epsilon}_{\theta \min} = -(0.73 \div 0.18)[s^{-1}]$. Ove vrijednosti su više po apsolutnoj vrijednosti za gornji nivo faktora x_2 i donji nivo faktora x_3 .



Slika 8.26. 3D dijagram obodne brzine deformacije u tački eksperimentalnog plana broj 7, dobijen DEFORM simulacijom

U tačkama eksperimentalnog plana broj: 7, 11, 12, 15 i 16, smičuća brzina deformacije je tipa datog na Slici 8.27. Maksimalne vrijednosti u ovim tačkama kreću se u rasponu: $\dot{\gamma}_{rz \max} = (0.54 \div 2.46)[s^{-1}]$, a minimalne u rasponu: $\dot{\gamma}_{rz \min} = -(2.59 \div 0.56)[s^{-1}]$. Ove ekstremne vrijednosti u navedenim tačkama su veće po apsolutnoj vrijednosti za tačke eksperimentalnog plana sa gornjim nivoom faktora x_2 i donjim nivoom faktora x_3 . Konstantni dio u drugoj polovini vijenca je nešto viši po apsolutnim vrijednostima i sa donje strane je približno: $\dot{\gamma}_{rz} \sim 0.39[s^{-1}]$, a sa gornje strane iznosi približno: $\dot{\gamma}_{rz} \sim 0.40[s^{-1}]$.



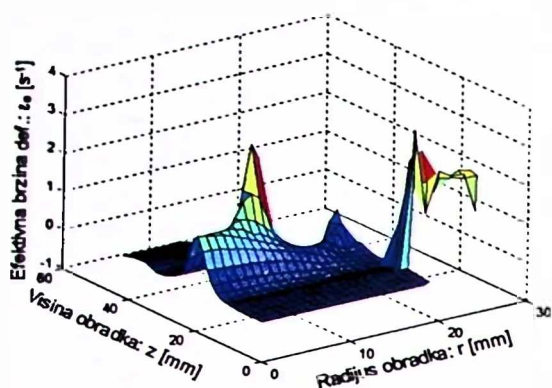
Slika 8.27. 3D dijagram smičuće brzine deformacije u tački eksperimentalnog plana broj 7, dobijen DEFORM simulacijom

Kod smičuće brzine deformacije karakteristične su ekstremne vrijednosti u zoni vijenca koje se nalaze za vrijednost radijusa koja odgovara prvoj četvrtini vijenca. U centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 18, maksimalna vrijednost je sa donje strane vijenca i iznosi: $\dot{\gamma}_{rz \max} = 8.26[s^{-1}]$, a minimalna vrijednost je sa gornje strane vijenca i iznosi: $\dot{\gamma}_{rz \min} = -9.86[s^{-1}]$. U ostalim tačkama maksimalne vrijednosti se kreću u rasponu: $\dot{\gamma}_{rz \max} = (0.54 \div 18.53)[s^{-1}]$, a minimalne u: $\dot{\gamma}_{rz \min} = -(16.91 \div 0.56)[s^{-1}]$. Za vrijednosti radijusa koje odgovaraju drugoj polovini vijenca smičuća brzina deformacije poprima konstantan karakter sa vrijednostima bliskim nuli.

Najizraženija ekstremna vrijednost u kalupu, u navedenim tačkama, jeste minimum u blizini prelaza prvog u drugi nivo kalupa za vrijednost maksimalnog radijusa drugog nivoa i kreće se u rasponu: $\dot{\gamma}_{rz \min} = -(4.61 \div 2.19)[s^{-1}]$. Ove vrijednosti su, takođe, veće po apsolutnoj vrijednosti za tačke eksperimentalnog plana sa gornjim nivoom faktora x_2 i donjim nivoom faktora x_3 .

Najuticajnije brzine deformacije na efektivnu brzinu deformacije su radijalna i aksijalna, pa ove brzine deformacije imaju sličan karakter promjene (Slika 8.28). Maksimum u zoni vijenca, u centralnoj tački plana eksperimenta iznosi: $\dot{\epsilon}_{c \max} = 9.37[s^{-1}]$, a u ostalim tačkama plana kreće se u rasponu: $\dot{\epsilon}_{c \max} = (2.58 \div 14.44)[s^{-1}]$. Više vrijednosti

dobijene su za donji nivo faktora x_4 . Najviše vrijednosti su za donji nivo faktora x_2 i gornji nivo faktora x_3 . Približno konstantni dio u drugom dijelu vijenca se kreće u rasponu: $\dot{\epsilon}_c = (1.8 \div 2.0)[s^{-1}]$.



Slika 8.28. 3D dijagram efektivne brzine deformacije u tački eksperimentalnog plana broj 7, dobijen DEFORM simulacijom

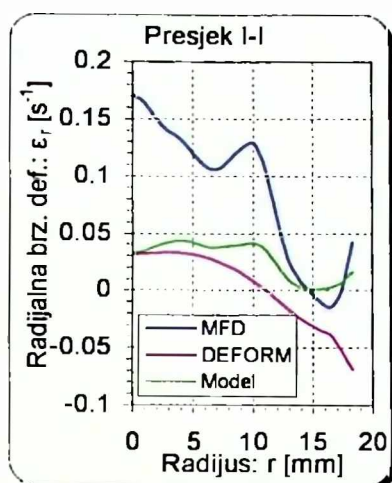
U tačkama u kojima materijal ne popunja potpuno kalup (tačke broj: 7, 11, 12, 15 i 16) efektivna brzina deformacije je tipa datog na slici 8.28. Maksimalna vrijednost u zoni vijenca u ovim tačkama eksperimentalnog plana je: $\dot{\epsilon}_{e\max} = (2.58 \div 3.53)[s^{-1}]$. U zoni kalupa ekstremna vrijednost je u blizini prelaza prvog u drugi nivo, za maksimalnu vrijednost radijusa drugog nivoa i kreće se u rasponu: $\dot{\epsilon}_{e\max} = (1.88 \div 3.82)[s^{-1}]$. Povećana vrijednost efektivne brzine deformacije se prostire do sredine prvog nivoa gornjeg kalupa na osi simetrije i ova vrijednost se kreće u rasponu: $\dot{\epsilon}_e = (0.36 \div 1.47)[s^{-1}]$. Najviše ekstremne vrijednosti su dobijene za donji nivo faktora x_4 , a najniže vrijednosti za gornji nivo faktora x_2 i donji nivo faktora x_3 .

8.2.3. Poređenje brzina deformacija

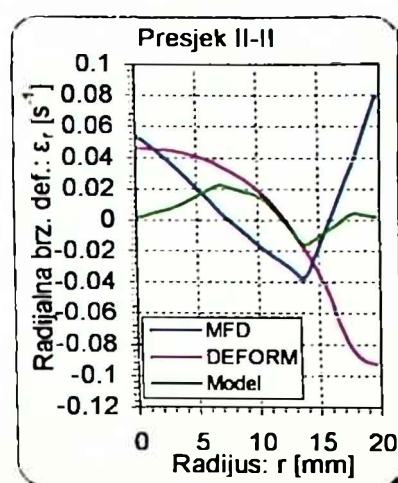
Za kvantitativnu analizu brzina deformacija urađeni su dijagrami u karakterističnim presjecima meridijalne ravni obradka, koji su dati na Slici 8.13. Na dijagramima su predstavljeni sve komponente brzina deformacija dobijeni MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem u centralnoj tački eksperimentalnog plana (Slika 8.29. do Slika 8.33.). Analizom navedenih dijagrama u centralnoj tački plana broj 18, sagledavaju se sličnosti i razlike u vrijednostima i karakteru promjene brzina deformacija, dobijenih na različite načine.

Radijalne brzine deformacije dobijene MFD i DEFORM simulacijom u svim presjecima imaju relativno niske vrijednosti $-0.3 < \dot{\epsilon}_r < 0.3[s^{-1}]$, pa se može kazati da je odstupanje malo, osim u presjeku podione ravni III-III, koja se prostire po sredini zone vijenca. Poklapanje u zoni kalupa u ovom presjeku je dobro, a razlike u vrijednostima i karakteru promjene, opisane u prethodnim tačkama su jasno izražene.

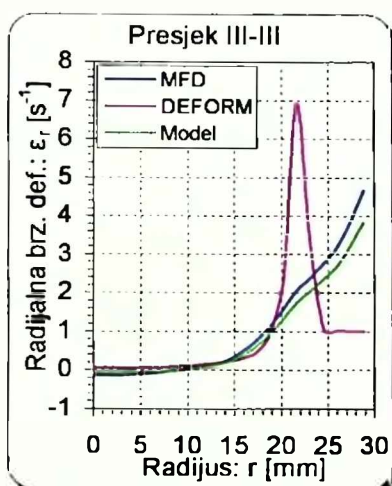
Trend koji je opisan kod radijalne brzine deformacije važi za sve druge brzine deformacija u svim presjecima. Najviše relativne razlike su kod smičuće deformacije, jer je relativno niska maksimalna ekstremna vrijednost, pa su pored presjeka u podionoj ravni povećane vrijednosti odstupanja i u presjecima IV-IV i V-V. Međutim, smičuća brzina deformacije se kreće u relativno niskim granicama: $-0.7 < \dot{\gamma}_{rz} < 0.3[s^{-1}]$, što su relativno male vrijednosti u odnosu na maksimalnu brzinu deformacije.



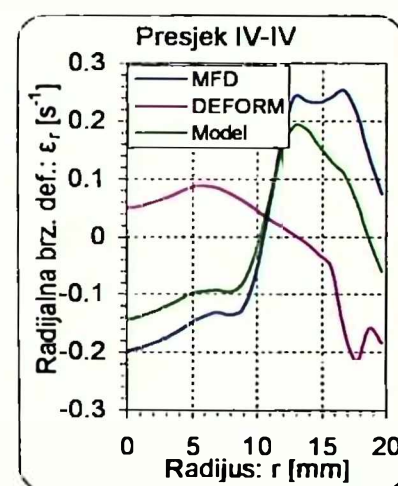
a)



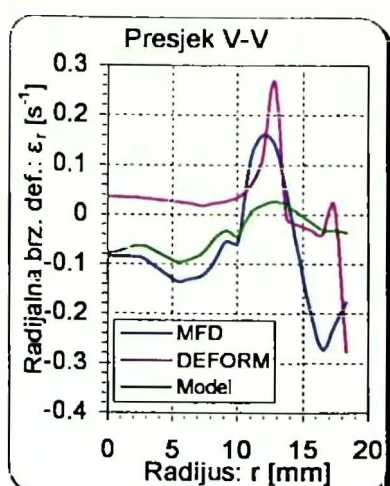
b)



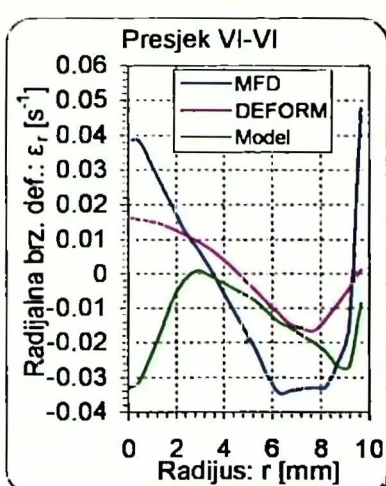
c)



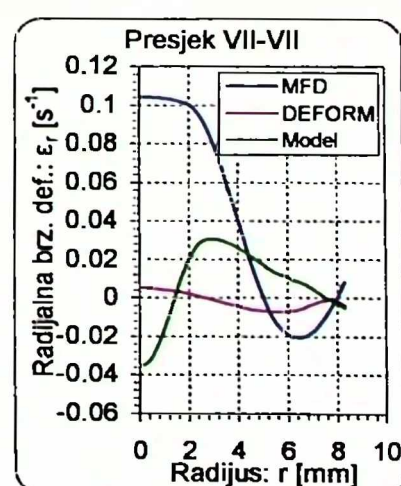
d)



e)

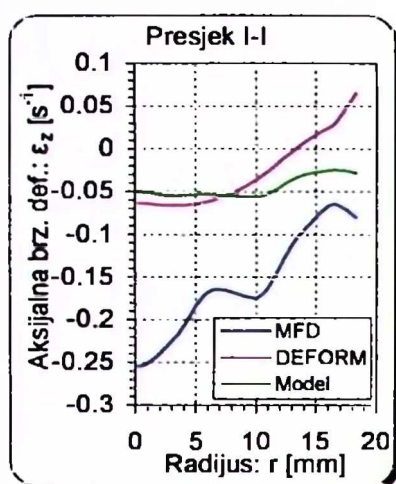


f)

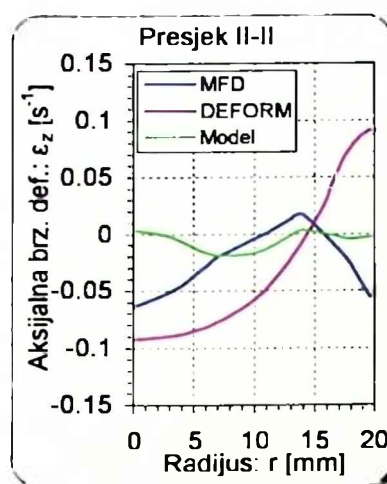


g)

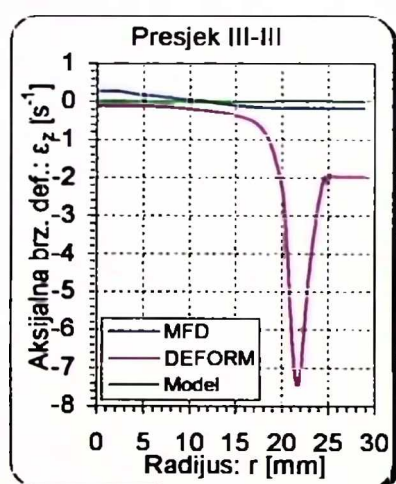
Slika 8.29. Radijalna brzina deformacije $\dot{\epsilon}_r$ [s^{-1}] u centralnoj tački plana dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII



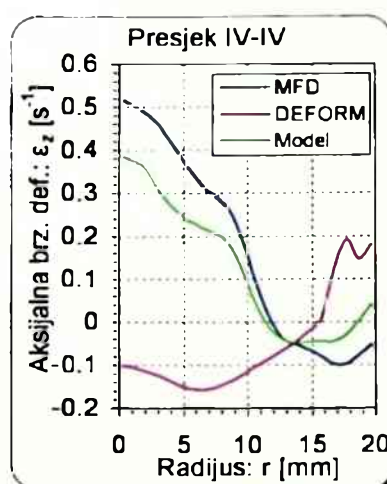
a)



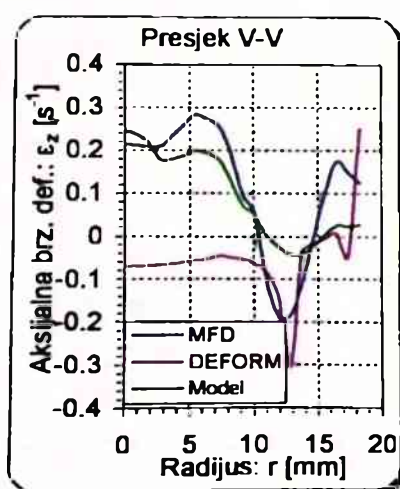
b)



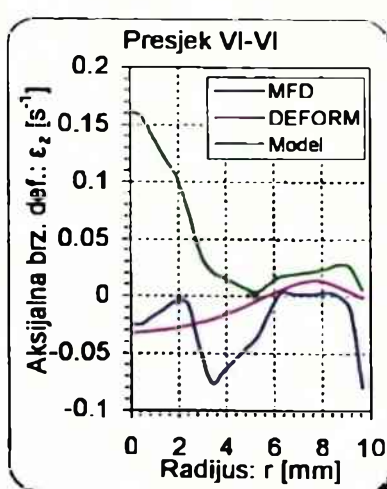
c)



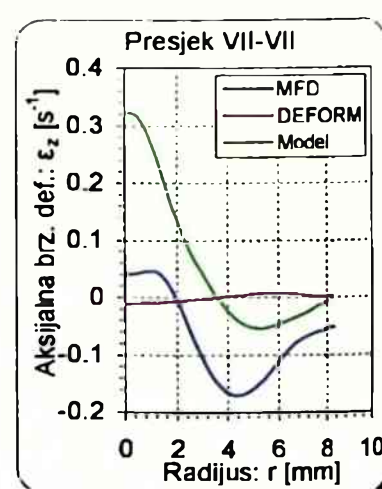
d)



e)

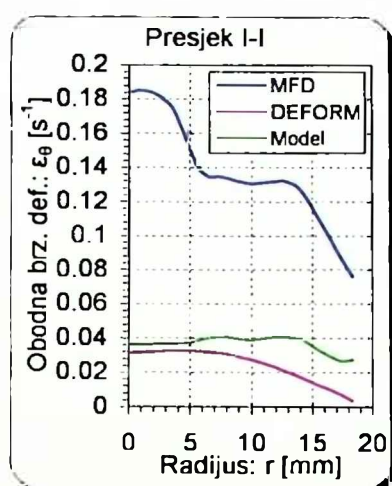


f)

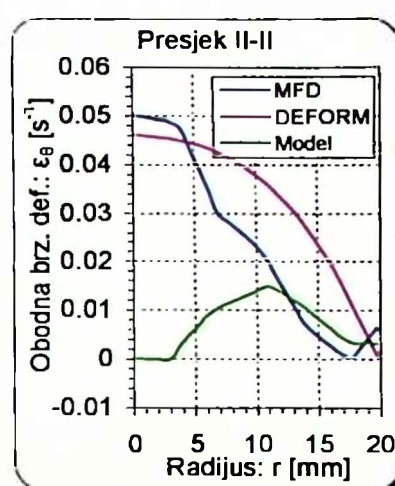


g)

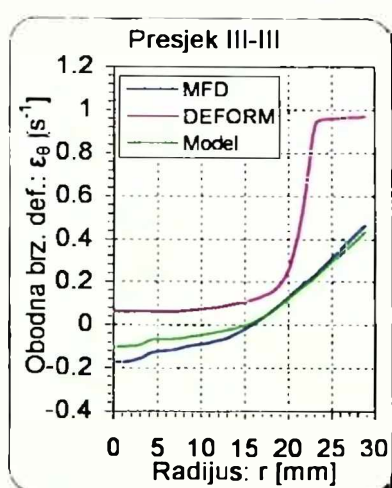
Slika 8.30. Aksijalna brzina deformacije $\dot{\epsilon}_z$ [s^{-1}] u centralnoj tački plana dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII



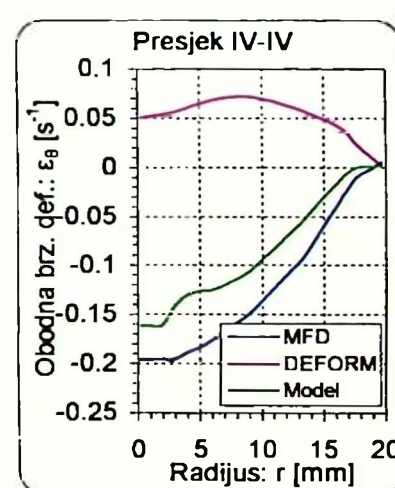
a)



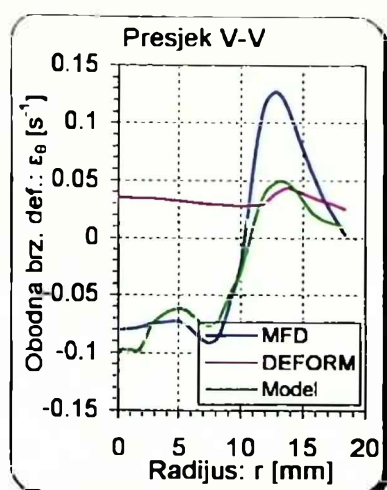
b)



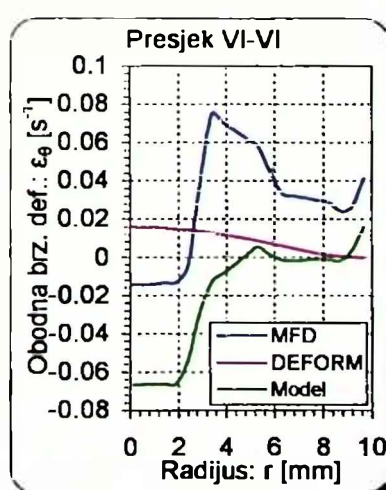
c)



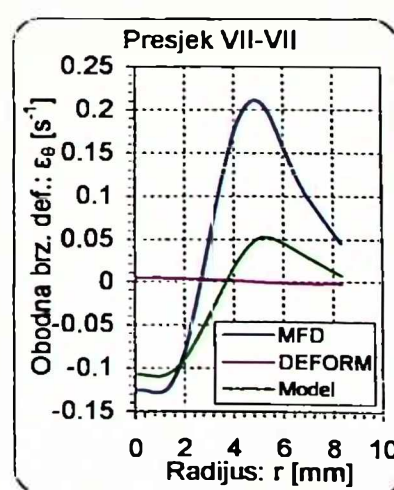
d)



e)

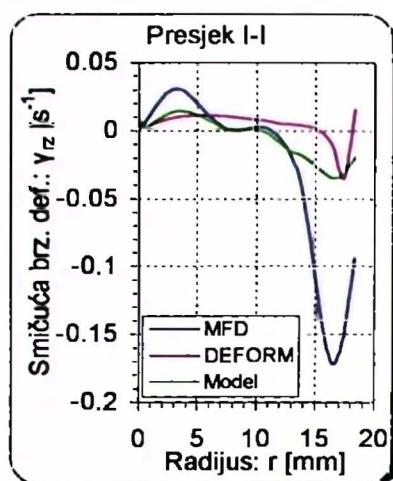


f)

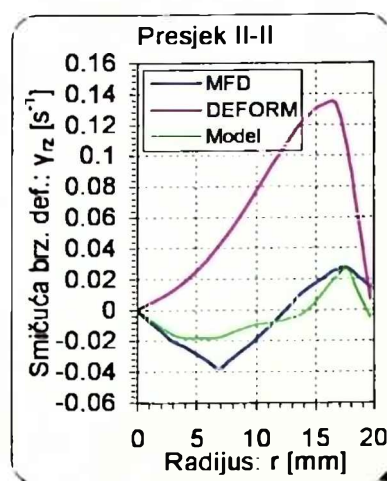


g)

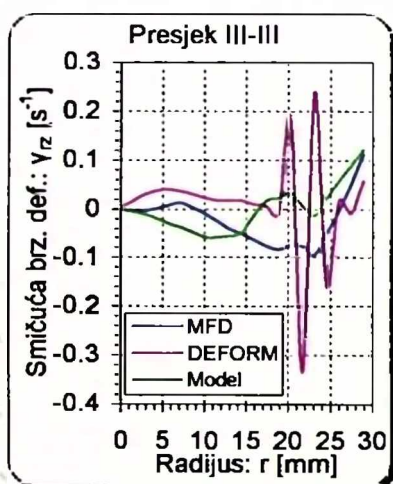
Slika 8.31. Obodna brzina deformacije $\dot{\epsilon}_\theta$ [s⁻¹] u centralnoj tački plana dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII



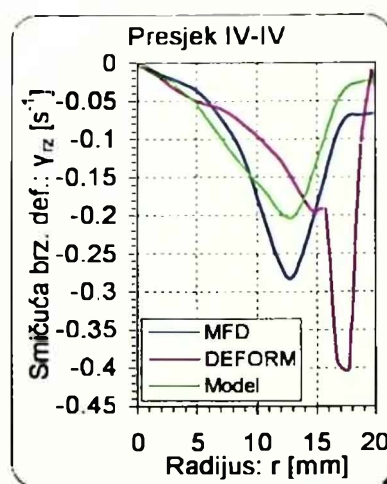
a)



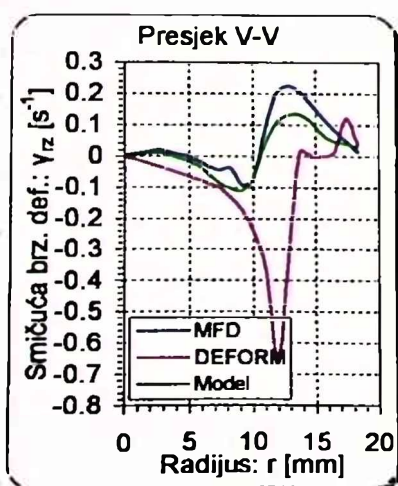
b)



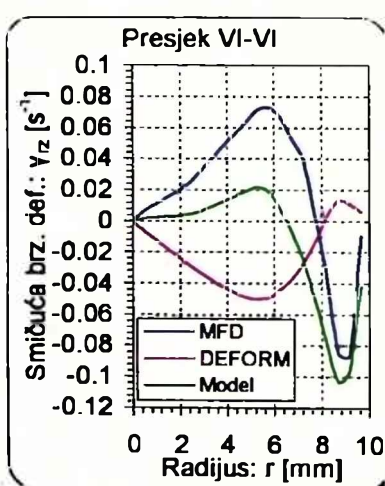
c)



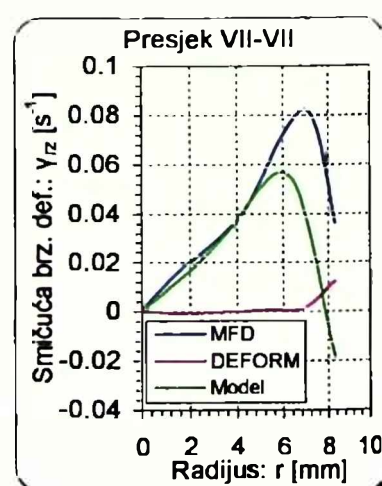
d)



e)

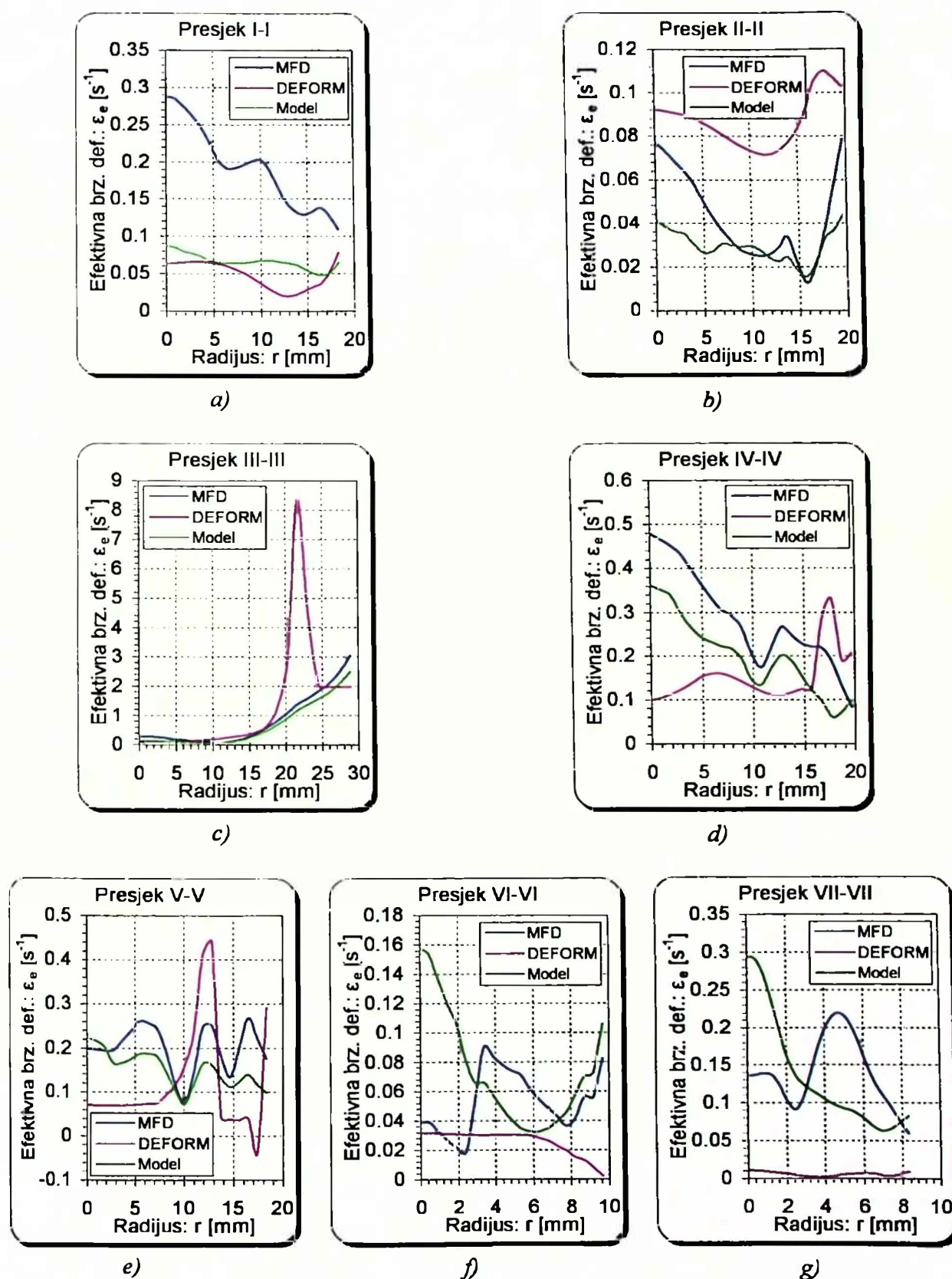


f)



g)

Slika 8.32. Smičuća brzina deformacije $\dot{\gamma}_z [s^{-1}]$ u centralnoj tački plana dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII



Slika 8.33. Efektivna brzina deformacije $\dot{\epsilon}_e$ [s⁻¹] u centralnoj tački plana dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII

8.3. ANALIZA NAPONA

Za razliku od deformacija i brzina deformacija, kod napona je značajan uticaj temperature, pa se pored geometrijskih parametara kalupa i priprema, uzima u obzir faktor temperature kao peti faktor. Kao primjer za analizu uzeta je centralna tačka plana broj 33 u kojoj su 3D dijagrami dobijenih napona dati u Tački 7.1.3. (Slika 7.26. do Slike 7.30.).

8.3.1. Analiza napona dobijenih MFD

Sa dijagrama normalnih napona se zaključuje da su ovi naponi negativni, tj. u pitanju je naponsko stanje na pritisak, pa se i analiza koja slijedi, odnosi na njihove apsolutne vrijednosti. Kod svih normalnih napona dobijene su niže vrijednosti za gornji nivo faktora temperature x_5 .

Minimalna vrijednost radijalnog napona je na kraju vijenca. U centralnoj tački plana ova vrijednost iznosi: $\sigma_{rmin} = -0.41 [\text{daN/mm}^2]$. U ostalim tačkama eksperimentalnog plana ova vrijednost se kreće u rasponu: $\sigma_{rmin} = -(0.14 \div 0.49) [\text{daN/mm}^2]$. Kompletan rešenje naponskog stanja zasnovano je, između ostalog, na pretpostavci da je radijalni napon u zoni vijenca: $\sigma_{rv} = 0$. Usled računskih grešaka određivanja aksijalnog napona i na osnovu veze radijalnog i aksijalnog napona iz jednačina Levy-Misses-a (3.34) dobijena je mala vrijednost bliska nuli, što se može prihvatiti kao dovoljno tačno.

Radijalni napon u zoni kalupa ima nekoliko nivoa vrijednosti. Uglavnom je opadajuća funkcija radijusa osim u drugom nivou gornjeg kalupa, gdje u blizini maksimalnih vrijednosti radijusa ima nagli rast. Minimalna vrijednost radijalnog napona u ovom nivou je u blizini maksimalnih vrijednosti visine i radijusa. To je posledica toga što u toj tački materijal popunjava kalup u zadnjoj fazi procesa deformisanja i u centralnoj tački plana eksperimenta radijalni napon iznosi: $\sigma_r = -10.61 [\text{daN/mm}^2]$. U ostalim tačkama plana kreće se u rasponu: $\sigma_{rmin} = -(20.44 \div 2.79) [\text{daN/mm}^2]$. Najniže maksimalne vrijednosti su dobijene za tačke eksperimentalnog plana sa gornjim nivoima faktora x_1 i x_2 .

Najviše vrijednosti su dobijene u centralnoj oblasti kalupa za radijuse manje od maksimalne vrijednosti drugog nivoa. Maksimalna vrijednost je na osi, po sredini visine obradka i u centralnoj tački iznosi: $\sigma_r = -25.94 [\text{daN/mm}^2]$. U ostalim tačkama plana kreće se u rasponu: $\sigma_r = -(48.42 \div 20.11) [\text{daN/mm}^2]$. Ove vrijednosti su više za donji nivo faktora x_2 i x_3 i gornji nivo faktora x_1 . Sa povećanjem prečnika priprema dobijaju se niže vrijednosti.

Preostali karakteristični nivo vrijednosti radijalnog napona je u dijelu kalupa za vrijednosti radijusa od maksimalne vrijednosti radijusa drugog nivoa do maksimalne vrijednosti radijusa kalupa. U centralnoj tački plana srednja vrijednost radijalnog napona iznosi: $\sigma_r = -14.5 [\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama plana kreće se u rasponu: $\sigma_r = -(24.1 \div 8.6) [\text{daN/mm}^2]$. Više vrijednosti se dobijaju za donji nivo vrijednosti faktora x_2 i gornji nivo faktora x_1 i x_4 .

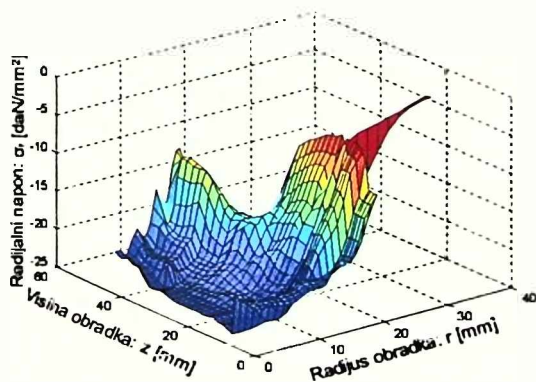
Aksijalni i obodni napon imaju sličan karakter promjene kao radijalni napon. Njihova minimalna vrijednost na kraju vijenca u centralnoj tački plana iznosi: $\sigma_{zmin} = -3.88 [\text{daN/mm}^2]$ i: $\sigma_{\theta min} = -3.42 [\text{daN/mm}^2]$, što predstavlja iznose koji su bliski efektivnom naponu za vrijednost efektivne logaritamske deformacije na tom mjestu. U ostalim tačkama plana vrijednosti ova dva normalna napona na kraju vijenca se kreće u rasponu: $\sigma_{zmin} = -(4.64 \div 3.77) [\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta min} = -(4.01 \div 2.91) [\text{daN/mm}^2]$. Njihove minimalne vrijednosti u drugom nivou gornjeg kalupa centralne tačke plana iznose: $\sigma_{zmin} = -12.9 [\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta min} = -10.26 [\text{daN/mm}^2]$, dok se u ostalim tačkama

eksperimentalnog plana kreću u rasponima: $\sigma_{z\min} = -(43.12 \div 2.36) [\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta\min} = -(20.51 \div 2.78) [\text{daN/mm}^2]$.

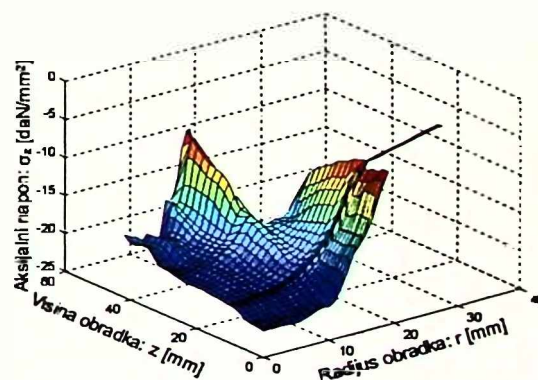
Na osi simetrije aksijalni napon je, za razliku od radijalnog, konveksna funkcija visine i u centralnoj tački plana broj 18, maksimalne vrijednosti su dobijene za nultu i maksimalnu vrijednost visine i iznose: $\sigma_{z\max} = -26.61 [\text{daN/mm}^2]$. U ostalim tačkama plana maksimalna vrijednost se dobija za nultu vrijednost visine i kreće se u rasponu: $\sigma_{z\max} = -(47.27 \div 19.02) [\text{daN/mm}^2]$. Obodni napon se na osi simetrije ponaša na sličan način kao radijalni, tj. konveksna je funkcija radijusa i maksimalna vrijednost u centralnoj tački plana je: $\sigma_{\theta\max} = -10.26 [\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama kreće se u rasponu: $\sigma_{\theta\max} = -(42.97 \div 13.07) [\text{daN/mm}^2]$.

U dijelu kalupa, za vrijednosti radijusa koje se kreću od maksimalnog radijusa drugog nivoa, pa do maksimalne vrijednosti radijusa kalupa, u centralnoj tački plana srednje vrijednosti aksijalnog i obodnog napona iznose: $\sigma_z = -17.66 [\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_\theta = -17 [\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama plana kreću se u rasponima: $\sigma_z = -(27.46 \div 9.67) [\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_\theta = -(26.16 \div 10.67) [\text{daN/mm}^2]$.

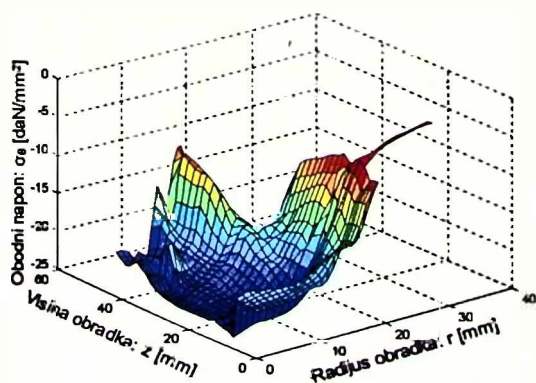
Odstupanja normalnih napona od njihovih tipskih karaktera promjene su u tačkama gdje materijal ne popunjava u potpunosti drugi nivo gornjeg kalupa. To su tačke eksperimentalnog plana sa gornjim nivoima faktora x_1 i x_4 . Kao primjer daju se normalni naponi u tački broj 16 (Slika 8.34. do Slike 8.36.). Sa tih dijagrama je primjetno da aksijalni napon, u



Slika 8.34. Radijalni napon σ_r u tački eksperimentalnog plana broj 16, dobijen MFD



Slika 8.35. Aksijalni napon σ_z u tački eksperimentalnog plana broj 16, dobijen MFD



Slika 8.36. Obodni napon σ_θ u tački eksperimentalnog plana broj 16, dobijen MFD

blizini maksimalne vrijednosti radijusa drugog nivoa gornjeg kalupa za maksimalnu visinu obradka, ima vrijednost blizu nule, a da su radijalni i obodni naponi jednaki efektivnom naponu za vrijednost efektivne deformacije na tom mjestu, što je karakteristično za slobodne čeonu površine. Za donji kalup i prvi nivo gornjeg kalupa je karakteristično da napon ravnomjerno opada sa porastom radijusa od polovine maksimalnog radijusa drugog nivoa gornjeg kalupa do maksimalnog radijusa kalupa, gdje ima niske vrijednosti bliske vrijednostima efektivnog napona.

Dobijeni smičući naponi su za jedan red veličine manji od normalnih napona. Funkcija promjene ovih napona je dosta nestabilna i

promjenjljiva funkcija zbog složenog odnosa smičuće deformacije i izvedenih veličina kakve su efektivna brzina deformacije i efektivni napon.

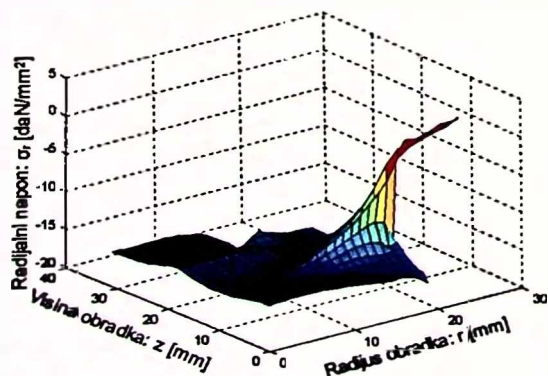
U zoni vijenca dobijene su ekstremne vrijednosti smičućeg napona približno za vrijednost radijusa koja odgovara sredini vijenca. Sa donje strane je maksimalna vrijednost, a sa gornje strane minimalna i u centralnoj tački plana iznose: $\tau_{rz\max}=1.53[\text{daN/mm}^2]$ i $\tau_{rz\min}=-1.55[\text{daN/mm}^2]$, dok se u ostalim tačkama ekstremi kreću u rasponima: $\tau_{rz\max}=(1.03\div 1.85)[\text{daN/mm}^2]$ i $\tau_{rz\min}=-(1.83\div 0.89)[\text{daN/mm}^2]$.

U zoni klaupa vrijednost smičućeg napona na osi simetrije je jednaka nuli. Po sredini oblasti donjeg kalupa za vrijednosti radijusa veće od maksimalnog radijusa, nalazi se lokalni maksimum smičućeg napona i u centralnoj tački plana on iznosi: $\tau_{rz\max}=1.506[\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama kreće se u rasponu: $\tau_{rz\max}=(1.05\div 1.77)[\text{daN/mm}^2]$. U sredini oblasti prvog nivoa gornjeg kalupa za radijuse veće od maksimalnog radijusa drugog nivoa, nalazi se lokalni minimum smičućeg napona i u centralnoj tački plana on iznosi: $\tau_{rz\min}=1.42[\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama kreće se u rasponu: $\tau_{rz\min}=-(1.87\div 1.38)[\text{daN/mm}^2]$. U sredini drugog nivoa gornjeg kalupa dobijen je lokalni maksimum koji iznosi: $\tau_{rz\max}=1[\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama eksperimentalnog plana kreće se u rasponu: $\tau_{rz\max}=(1.02\div 1.64)[\text{daN/mm}^2]$.

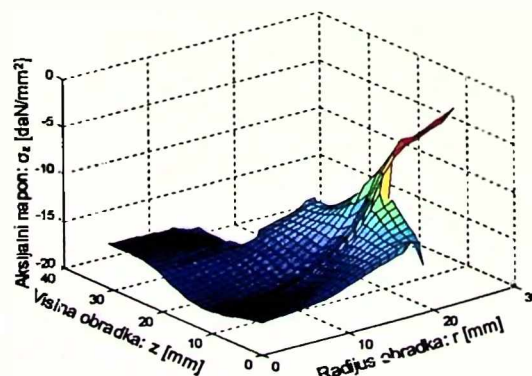
Promjena efektivnog napon sračunatog na osnovu komponentnih napona je identična efektivnom naponu dobijenom na osnovu krivih ojačavanja za odgovarajuću vrijednost efektivne deformacije, što predstavlja potvrdu tačnosti određivanja komponeneta brzina deformacija i komponenata napona. Maksimalna vrijednost efektivnog napona u centralnoj tački plana je na kraju vijenca i iznosi: $\sigma_e=3.32[\text{daN/mm}^2]$. U donjem kalupu vrijednost efektivnog napona je ujednačena i iznosi približno: $\sigma_e\sim 2.75[\text{daN/mm}^2]$, a prvom nivou gornjeg kalupa za vrijednosti radijusa veće od maksimalnog radijusa drugog nivoa je: $\sigma_e\sim 2.85[\text{daN/mm}^2]$. Na osi simetrije, sa gornje strane podione ravni nalazi se lokalni minimum, koji ima vrijednost: $\sigma_{e\min}=2.04[\text{daN/mm}^2]$.

8.3.2. Analiza napona dobijenih DEFORM simulacijom

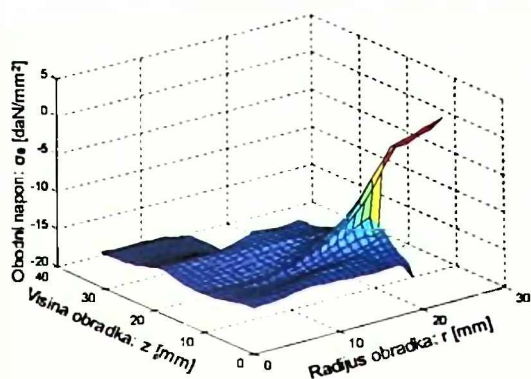
DEFORM simulacija je urađena u svim tačkama eksperimentalnog plana, a osjenčeni dijagrami promjene komponenata napona dobijeni DEFORM simulacijom dati su na Slici 7.45. do Slike 7.49. Za analizu pogodniji 3D dijagrami, dobijeni pomoću MATLAB-a na osnovu numeričkih vrijednosti iznijetih iz DEFORM softverskog paketa, u centralnoj tački eksperimentalnog plana dati su na Slici 8.37. do Slike 8.41.



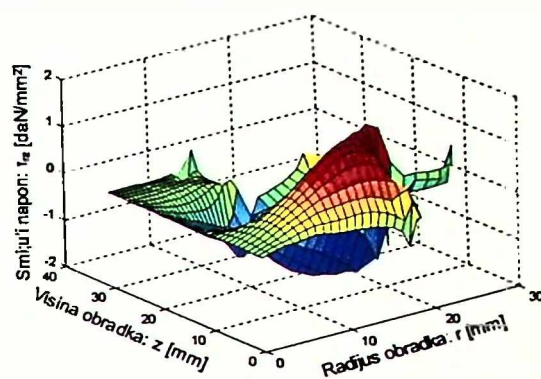
Slika 8.37. 3D dijagram radijalnog napona σ_r u centralnoj tački eksperimentalnog plana dobijen DEFORM simulacijom



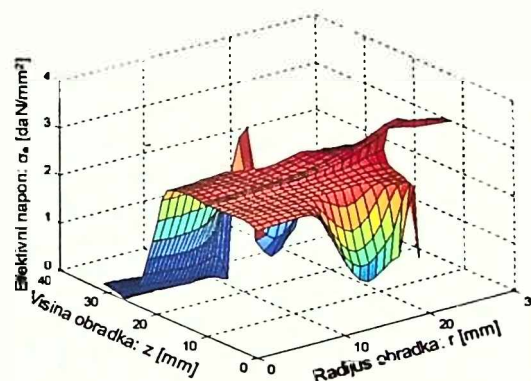
Slika 8.38. 3D dijagram aksijalnog napona σ_z u centralnoj tački eksperimentalnog plana dobijen DEFORM simulacijom



Slika 8.39. 3D dijagram obodnog napona σ_θ u centralnoj tački eksperimentalnog plana dobijen DEFORM simulacijom



Slika 8.40. 3D dijagram smičućeg napona τ_{rz} u centralnoj tački eksperimentalnog plana dobijen DEFORM simulacijom



Slika 8.41. 3D dijagram efektivnog napona σ_e u centralnoj tački eksperimentalnog plana dobijen DEFORM simulacijom

U tačkama eksperimentalnog plana broj: 7, 11, 12, 15, 16, 23, 27, 28, 31 i 32, gdje se DEFORM simulacijom ne dobija potpuno popunjavanje drugog nivoa gornjeg kalupa, analogno brzinama deformacija, karakter promjene napona je drugačijeg tipa i dat je na primjeru tačke eksperimentalnog plana broj 7 na Slici 8.42 do Slike 8.46.

Normalni naponi imaju sličan karakter promjene. Svi su negativni što znači da je u pitanju naponsko stanje na pritisak, pa će se analiza normalnih napona, kao i kod napona dobijenih MFD (Tačka 8.3.1.), vršiti u odnosu na njihove apsolutne vrijednosti. Minimalne vrijednosti su na kraju vijenca i u centralnoj tački plana iznose: $\sigma_{rmin}=0.21[\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_{zmin}=-2.97[\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta min}=0.04[\text{daN/mm}^2]$. U ostalim tačkama eksperimentalnog plana vrijednosti radijalnog, aksijalnog obodnog napona se kreću u rasponima: $\sigma_{rmin}=(-0.86 \div 0.21)[\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_{zmin}=-(4.13 \div 0.37)[\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta min}=(-1.58 \div 0.83)[\text{daN/mm}^2]$. Kod obodnog napona najviše maksimalne vrijednosti na kraju vijenca dobijene su za posebne tačke eksperimentalnog plana u kojima materijal u potpunosti ne popunjava drugi nivo gornjeg kalupa, dok se za preostala dva normalna napona ne može jasno ustanoviti karakter zavisnosti od ulaznih faktora.

U tačkama eksperimentalnog plana u kojima materijal popunjava čitav kalup normalni naponi su dosta ujednačeni u zoni kalupa. Na osi simetrije radijalni i obodni naponi su konveksna funkcija radijusa i maksimalni napon je za nultu vrijednost visine, a aksijalni napon je konkavan i maksimalna vrijednost je za vrijednost visine podione ravni. Ekstremne vrijednosti normalnih napona na osi simetrije su: $\sigma_{rmax}=-15.49[\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_{zmax}=-2.97[\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta max}=0.04[\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama plana normalni naponi se kreću u rasponima: $\sigma_{rmax}=-(18.74 \div 13.38)[\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_{zmax}=-(20.83 \div 15.11)[\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta max}=-(18.75 \div 13.38)[\text{daN/mm}^2]$. Više ekstremne vrijednosti su dobijene za donje nivoe faktora x_1 , x_3 i x_4 i gornji nivo faktora x_3 . U posebnim tačkama plana ove vrijednosti su približno na polovini donjeg kalupa i kreću u rasponima: $\sigma_{rmax}=-(18.74 \div 13.38)[\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_{zmax}=-(20.83 \div 15.11)[\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta max}=-(18.75 \div 13.38)[\text{daN/mm}^2]$.

Sa porastom radijusa od maksimalne vrijednosti u drugom nivou, normalni naponi opadaju. Srednji normalni naponi za maksimalne vrijednosti radijusa donjeg kalupa i prvog nivoa gornjeg kalupa su u centralnoj tački plana: $\sigma_r=-13.82[\text{daN/mm}^2]$,

$\sigma_{z\max} = -11.43 [\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta\max} = -12.54 [\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama plana kreću se u rasponima: $\sigma_r = -(16.31 \div 12.21) [\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_z = -(13.70 \div 10.42) [\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta} = -(14.89 \div 11.35) [\text{daN/mm}^2]$. Više vrijednosti se dobijaju za donje nivoe faktora x_2 , x_3 i x_4 . U posebnim tačkama plana ove vrijednosti se kreću u rasponima: $\sigma_r = -(8.90 \div 5.40) [\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_z = -(10.29 \div 7.50) [\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta} = -(9.79 \div 6.65) [\text{daN/mm}^2]$.

U drugom nivou gornjeg kalupa normalni naponi su ujednačeni i njihove vrijednosti u centralnoj tački plana su: $\sigma_r = -15.41 [\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_z = -15.39 [\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta} = -12.54 [\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama plana kreću se u rasponima: $\sigma_r = -(18.72 \div 13.35) [\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_z = -(18.68 \div 13.68) [\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta} = -(18.72 \div 13.34) [\text{daN/mm}^2]$. Više vrijednosti se dobijaju za donje nivoe faktora x_1 , x_2 , x_3 i x_4 . U posebnim tačkama plana ove vrijednosti se kreću u rasponima: $\sigma_r = -(3.04 \div 2.36) [\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_z = -(0.42 \div 0.07) [\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta} = -(2.98 \div 2.20) [\text{daN/mm}^2]$.

U drugom nivou gornjeg kalupa za maksimalnu vrijednost radijusa i vrijednosti visine u blizini prvog nivoa, normalni naponi imaju lokalne minimume, a za maksimalnu vrijednost visine prvog nivoa gornjeg kalupa neposredno poslije maksimalnog radijusa drugog nivoa imaju lokalne maksimume. Njihove vrijednosti u centralnoj tački plana su: $\sigma_{r\min} = -18.11 [\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_{z\min} = -16.87 [\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_{\theta\min} = -16.84 [\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_{r\max} = -13.16 [\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_{z\max} = -13.24 [\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta\max} = -13.15 [\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama plana minimalne vrijednosti se kreću u rasponima: $\sigma_{r\min} = -(21.26 \div 14.36) [\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_{z\min} = -(19.79 \div 13.91) [\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_{\theta\min} = -(20.04 \div 14.06) [\text{daN/mm}^2]$, a maksimalne vrijednosti aksijalnog napona su: $\sigma_{r\max} = -(16.04 \div 11.33) [\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_{z\max} = -(15.77 \div 12.21) [\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta\max} = -(15.56 \div 11.14) [\text{daN/mm}^2]$. Više vrijednosti se dobijaju za donje nivoe faktora x_1 , x_2 , x_3 i x_4 . U posebnim tačkama plana eksperimenta, u drugom nivou gornjeg kalupa za maksimalnu vrijednost radijusa i vrijednosti visine u blizini prvog nivoa postoje lokalni maksimumi i njihove vrijednosti se kreću u rasponima: $\sigma_{r\max} = (-3.16 \div 2.79) [\text{daN/mm}^2]$, $\sigma_{z\max} = (0.23 \div 1.95) [\text{daN/mm}^2]$ i $\sigma_{\theta\max} = (-2.37 \div 0.05) [\text{daN/mm}^2]$.

Smičući napon je za red veličine manji od vrijednosti normalnih napona i nema jasno izražen napon u zoni vijenca. U pitanju je približno konstantna vrijednost i iznosi: $\tau_{rz} \sim 0.22 [\text{daN/mm}^2]$, sa donje strane i: $\tau_{rz} \sim -0.22 [\text{daN/mm}^2]$, sa gornje strane vijenca. Ove vrijednosti prelaze u intenzivan rast po apsolutnoj vrijednosti u blizini kalupa i prelaze u ekstremne vrijednosti u kalupu. Maksimalna vrijednost se nalazi po sredini donjeg kalupa i sredini oblasti od maksimalnog radijusa drugog nivoa gornjeg kalupa do maksimalnog radijusa kalupa i iznosi u centralnoj tački plana eksperimenta: $\tau_{rz\max} = 1.64 [\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama plana kreće se u rasponu: $\tau_{rz\max} = (1.43 \div 1.83) [\text{daN/mm}^2]$. Po sredini prvog nivoa gornjeg kalupa, za vrijednosti radijusa veće od maksimalne vrijednosti drugog nivoa, nalazi se vrijednost lokalnog minimuma koja u centralnoj tački plana iznosi: $\tau_{rz\min} = -1.71 [\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama plana: $\tau_{rz\min} = -(1.90 \div 1.41) [\text{daN/mm}^2]$. Lokalni minimum se nalazi i u blizini prelaza prvog u drugi nivo gornjeg kalupa i u centralnoj tački plana iznosi: $\tau_{rz\min} = -1.40 [\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama plana kreće se u rasponu: $\tau_{rz\min} = -(1.75 \div 0.91) [\text{daN/mm}^2]$. Sve ove vrijednosti su veće po apsolutnoj vrijednosti za donje nivoe varijacije faktora: x_1 i x_4 . Na osi simetrije vrijednost smičućeg napona je jednaka nuli. Takođe, za maksimalnu vrijednost radijusa donjeg kalupa prvog nivoa gornjeg kalupa i najvećeg dijela drugog nivoa, srednja vrijednost smičućeg napona je približno jednaka nuli.

U posebnim tačkama plana u kojima materijal u potpunosti ne popunja kalup, funkcija smičućeg napona po sredini oblasti donjeg kalupa i prvog nivoa gornjeg kalupa naglašeno je izdubljena i dostiže minimum u blizini prelaza prvog nivoa gornjeg kalupa u drugi i on se kreće u rasponu: $\tau_{rz\min} = -(1.77 \div 1.46) [\text{daN/mm}^2]$. U istim tačkama eksperimentalnog plana smičući napon ima maksimum za vrijednost maksimalne visine prvog nivoa gornjeg kalupa u blizini prelaza prvog u drugi nivo i on se kreće u rasponu: $\tau_{rz\max} = (0.43 \div 1.09) [\text{daN/mm}^2]$, a

takođe i za istu vrijednost visine po sredini rastojanja od maksimalne vrijednosti drugog nivoa do maksimalne vrijednosti kalupa i iznosi: $\tau_{rzmax} = (0.71 \div 1.21) [\text{daN/mm}^2]$.

Kod efektivnog napona maksimalna vrijednost nije na kraju vijenca, već na prvoj četvrtini i u centralnoj tački plana iznosi: $\sigma_{emax} = 3.47 [\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama kreće se u rasponu: $\sigma_{emax} = (3.15 \div 3.54) [\text{daN/mm}^2]$. Vrijednost na kraju vijenca je: $\sigma_e = 3.21 [\text{daN/mm}^2]$, a ustalim tačkama plana ova vrijednost kreće se u rasponu: $\sigma_e = (2.71 \div 3.41) [\text{daN/mm}^2]$. Ove vrijednosti su veće za gornji nivo faktora x_1 i donji nivo faktora x_4 .

U najvećem dijelu donjeg i prvog nivoa gornjeg kalupa efektivni napon je dosta ujednačen i iznosi: $\sigma_e \sim 2.85 [\text{daN/mm}^2]$ u centralnoj tački plana, a u ostalim tačkama se kreće u rasponu: $\sigma_e = (2.21 \div 3.15) [\text{daN/mm}^2]$. Ove vrijednosti su veće za gornji nivo faktora x_1 i donji nivo faktora x_4 . U drugom nivou gornjeg kalupa vrijednost efektivnog napona pada približno na nulu, a lokalni maksimum se nalazi u blizini prelaza prvog u drugi nivo. U centralnoj tački plana on iznosi: $\sigma_{emax} = 3.38 [\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama plana kreće se u rasponu: $\sigma_{emax} = (1.75 \div 3.46) [\text{daN/mm}^2]$. U donjem kalupu, za vrijednosti radijusa od maksimalne vrijednosti drugog nivoa do maksimalne vrijednosti kalupa, od polovine visine prvog nivoa do nulte vrijednosti visine, efektivni napon pada i ima minimum za nultu vrijednost visine i sredinu navedene oblasti i iznosi: $\sigma_{emin} = 1 [\text{daN/mm}^2]$ u centralnoj tački plana, a u ostalim tačkama kreće se u rasponu: $\sigma_{emin} = (0.59 \div 1.13) [\text{daN/mm}^2]$. Slična je situacija i sa gornje strane prvog nivoa i u centralnoj tački plana iznosi: $\sigma_{emin} = 0.53 [\text{daN/mm}^2]$, a u ostalim tačkama plana kreće se u rasponu: $\sigma_{emin} = (0.32 \div 2.14) [\text{daN/mm}^2]$.

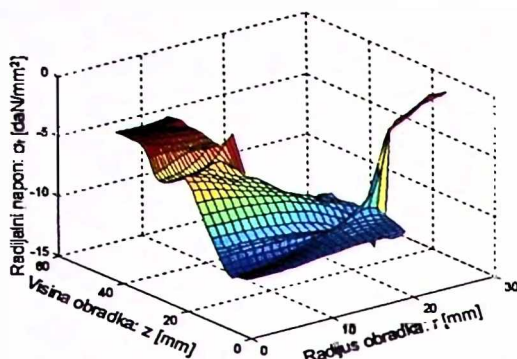
U posebnim tačkama eksperimentalnog plana efektivni napon u vijencu je približno konstantan i iznosi: $\sigma_e = (2.98 \div 3.34) [\text{daN/mm}^2]$. U donjem kalupu, odmah ispod podione ravni, efektivni napon počinje da opada i za nultu vrijednost visine i maksimalni radijus kreće se u rasponu: $\sigma_e = (0.03 \div 2.18) [\text{daN/mm}^2]$, a na osi simetrije iznosi: $\sigma_e = (0.41 \div 3.15) [\text{daN/mm}^2]$. Ujednačeni nivo vrijednosti efektivne deformacije u prvom kalupu kreće se u rasponu: $\sigma_e = (2.48 \div 3.08) [\text{daN/mm}^2]$ i on pada u drugom nivou gornjeg kalupa do vrijednosti: $\sigma_e = (1.82 \div 2.65) [\text{daN/mm}^2]$. Na mjestu prelaza prvog u drugi nivo je lokalni maksimum i vrijednosti efektivnog napona u posebnim tačkama se kreće u rasponu: $\sigma_{emax} = (3.01 \div 3.40) [\text{daN/mm}^2]$. Ovaj lokalni maksimum se nalazi neposredno iznad maksimalne visine prvog nivoa gornjeg kalupa, a naglašena vrijednost efektivne deformacije se prostire uz kalup do maksimalne visine obradka.

8.3.3. Poređenje napona

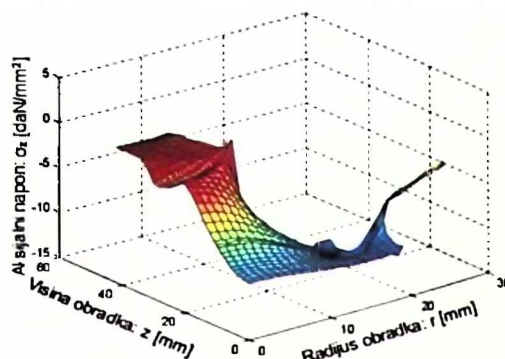
Dvodimenzionalni dijagrami promjene naponskih komponentata u karakterističnim presjecima (Slika 8.13.) su napravljeni radi kvantitativne analize rezultata dobijenih MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem (Slika 8.47. do Slike 8.51.).

Sa dijagrama radijalnog i obodnog normalnog napona (Slika 8.47. i Slika 8.49) se zaključuje da se ovi normalni naponi dobijeni MFD i DEFORM simulacijom razlikuju u vrijednostima i u svakom presjeku njihove apsolutne vrijednosti dobijene MFD su veće za približno: $|\Delta\sigma| \sim 10 [\text{daN/mm}^2]$. Sa porastom radijusa ove vrijednosti se približavaju i za maksimalnu vrijednost radijusa one se skoro u potpunosti poklapaju, osim radijalnog napona u presjeku VI-VI gdje na samom kraju radijusa dolazi do porasta apsolutnih vrijednosti i odstupaju za: $|\Delta\sigma_{r,0}| \sim 12.5 [\text{daN/mm}^2]$.

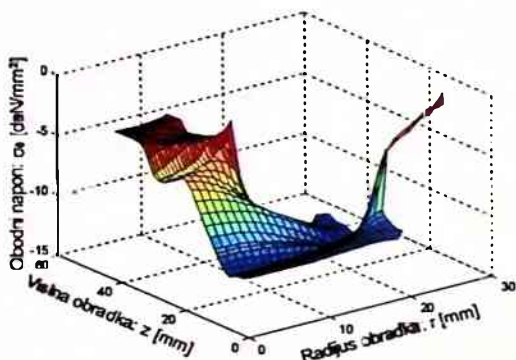
Aksijalni naponi se međusobno dobro poklapaju u svim presjecima osim, slično kao kod radijalnog napona, u presjeku VI-VI gdje na samom kraju radijusa dolazi do porasta apsolutnih vrijednosti i odstupanja za: $|\Delta\sigma_z| \sim 12.5 [\text{daN/mm}^2]$.



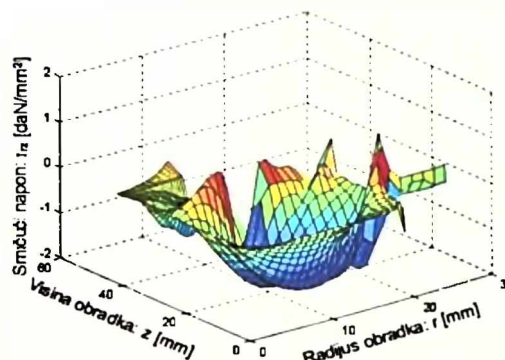
Slika 8.42. 3D dijagram radijalnog napona σ_r u tački broj 7 dobijen DEFORM simulacijom



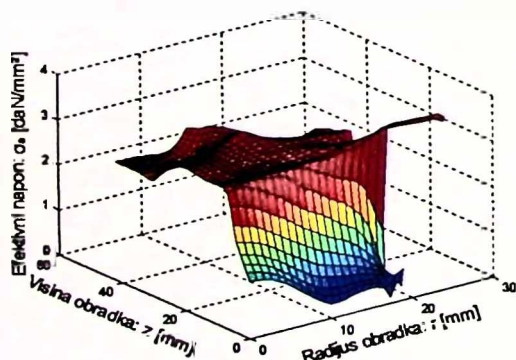
Slika 8.43. 3D dijagram aksijalnog napona σ_z u tački broj 7 dobijen DEFORM simulacijom



Slika 8.44. 3D dijagram obodnog napona σ_θ u tački broj 7 dobijen DEFORM simulacijom



Slika 8.45. 3D dijagram smičućeg napona τ_{rz} u tački broj 7 dobijen DEFORM simulacijom

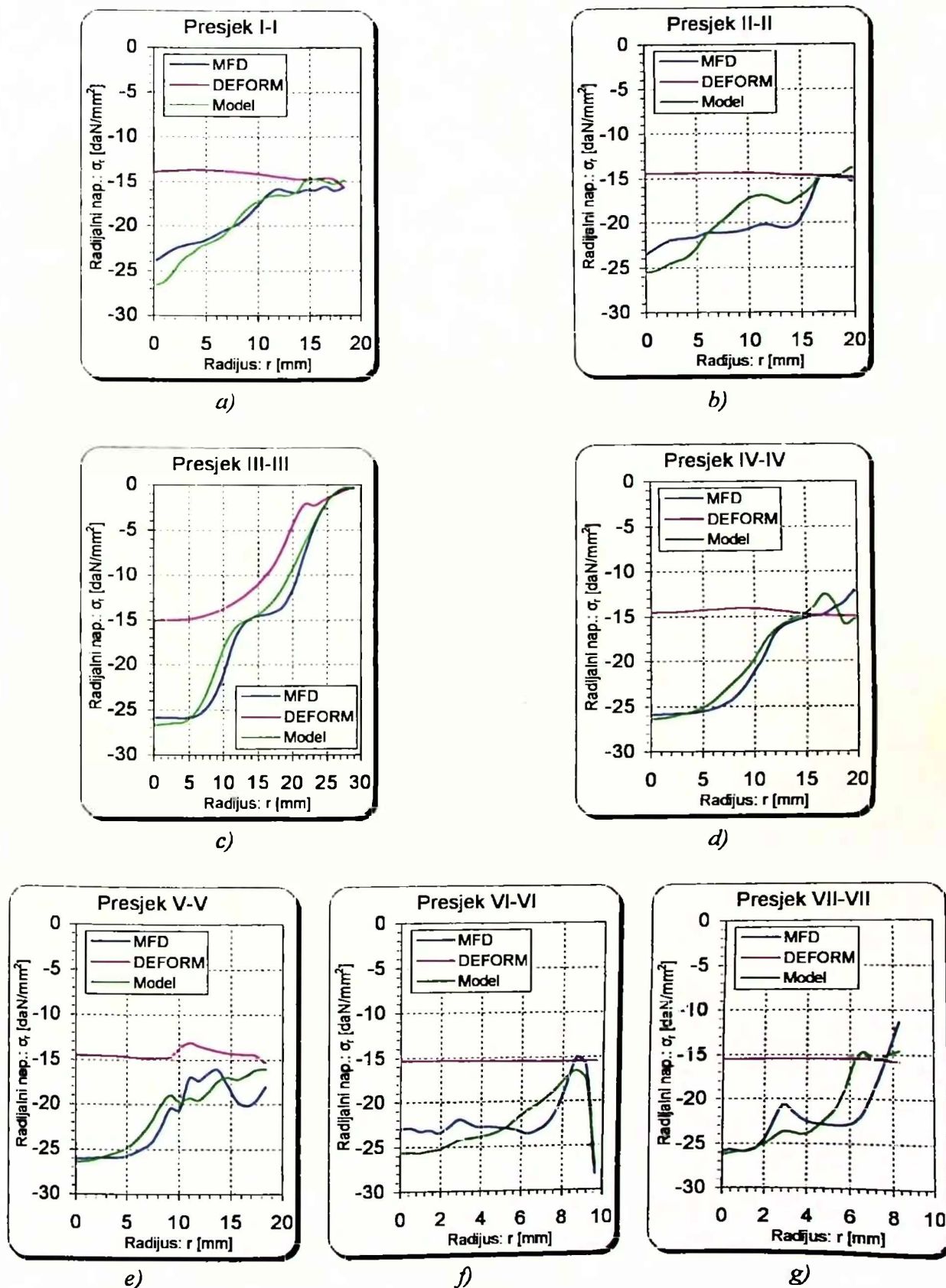


Slika 8.46. 3D dijagram efektivnog napona σ_e u tački br. 7 dobijen DEFORM simulacijom

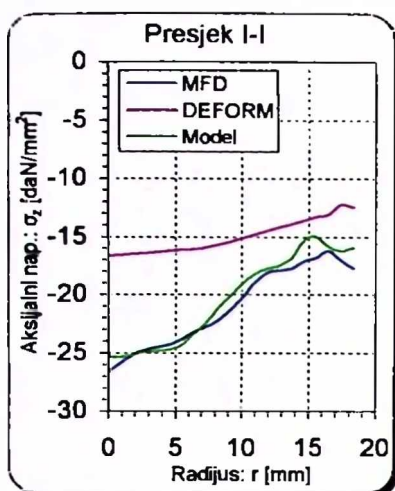
Kako je smičući napon za red veličine manji od normalnih, odstupanja vrijednosti dobijenih MFD i DEFORM simulacijom nijesu velika, a najveća, ne samo po vrijednostima nego i po karakteru promjene, su u presjecima II-II, VI-VI i VII-VII. U presjeku II-II smičući napon dobijen DEFORM simulacijom je pozitivan, dok kod istog napona u prvom dijelu dijagrama dobijen MFD je negativan i odstupanje se kreće do: $|\Delta\tau_{rz}| \sim 1.6 [\text{daN/mm}^2]$. U zadnjem dijelu dijagrami se dobro poklapaju. U presjecima drugog nivoa gornjeg kalupa smičući napon dobijen DEFORM simulacijom je približno jednak nuli, a dobijen MFD se razlikuje od nule, pa se odstupanje kreće do:

$|\Delta\tau_{rz}| < 1.4 [\text{daN/mm}^2]$ u presjeku VI-VI i $|\Delta\tau_{rz}| < 0.6 [\text{daN/mm}^2]$ u presjeku VII-VII.

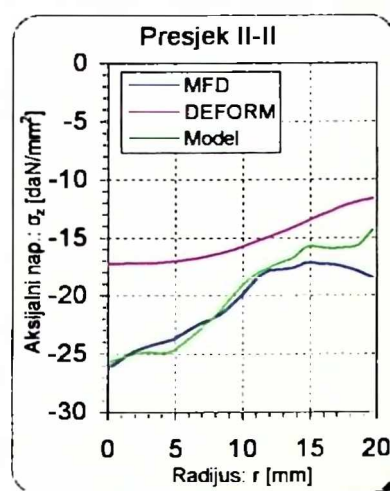
I efektivni napon je za red veličine manji od normalnih napona, a najbolje poklapanje je u presjecima II-II, III-III i IV-IV. U presjeku I-I u prvoj polovini poklapanje je dobro, dok u drugom dijelu efektivni napon dobijen DEFORM simulacijom ima pad vrijednosti, a MFD daje približno konstantne vrijednosti, pa odstupanje dostiže $|\Delta\sigma_e| < 1.6 [\text{daN/mm}^2]$. U presjeku V-V odstupanje u prvom dijelu dijagrama efektivnog napona se kreće do: $|\Delta\sigma_e| < 1.1 [\text{daN/mm}^2]$, a u drugom dijelu do: $|\Delta\sigma_e| < 2.1 [\text{daN/mm}^2]$. U presjecima VI-VI i VII-VII efektivni naponi su približno konstantni, pri čemu je efektivni napon dobijen DEFORM simulacijom ima male vrijednosti približno jednake nuli, pa je odstupanje približno: $|\Delta\sigma_e| \sim 1.1 [\text{daN/mm}^2]$.



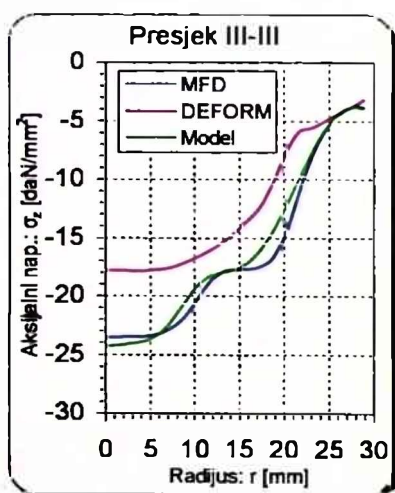
Slika 8.47. Radijalni napon σ_r , [daN/mm^2] u centralnoj tački plana dobijen MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII



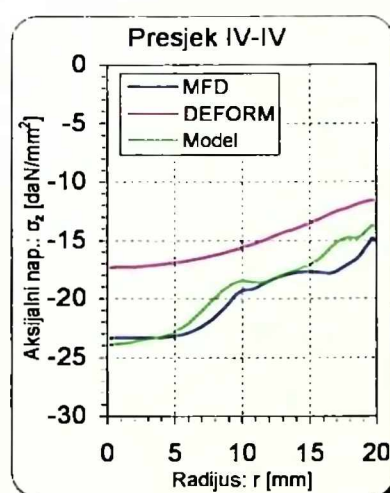
a)



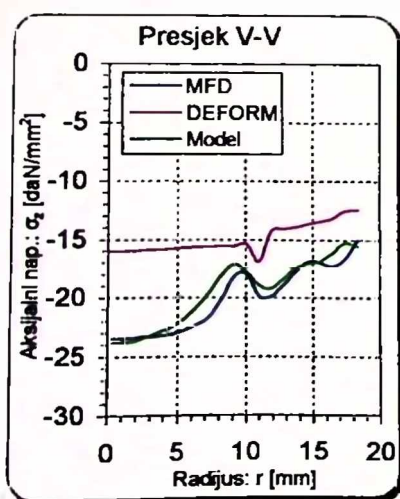
b)



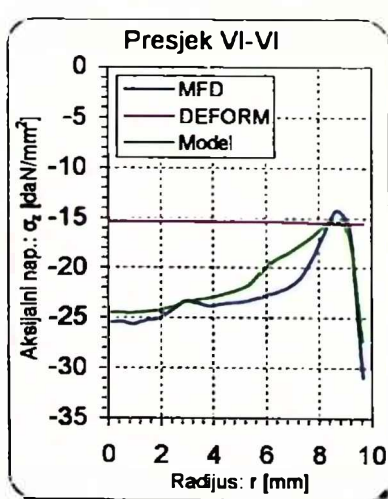
c)



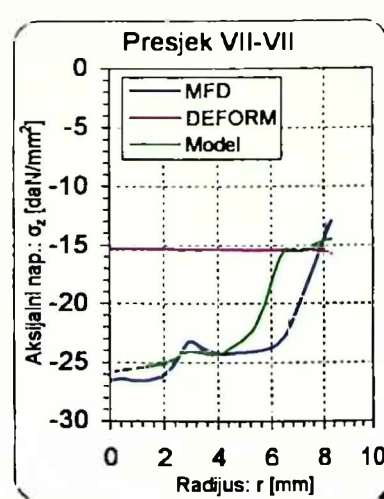
d)



e)

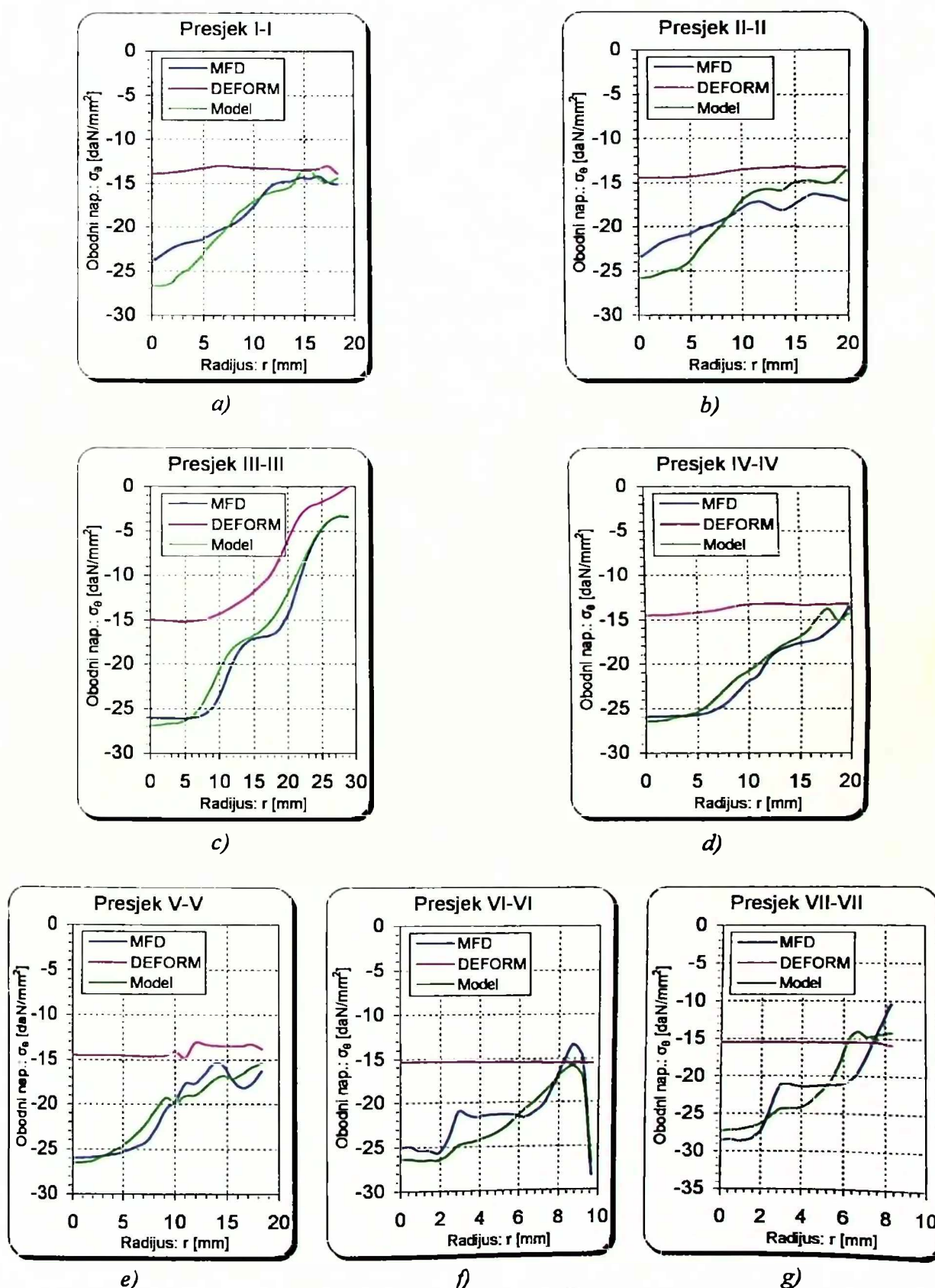


f)

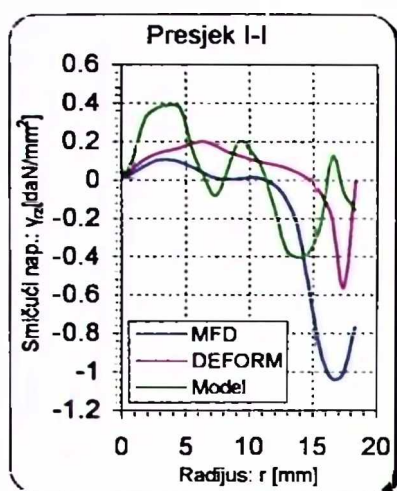


g)

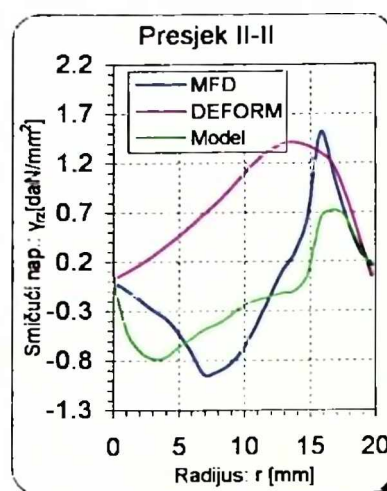
Slika 8.48. Aksijalni napon σ_z [daN/mm²] u centralnoj tački plana dobijen MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII



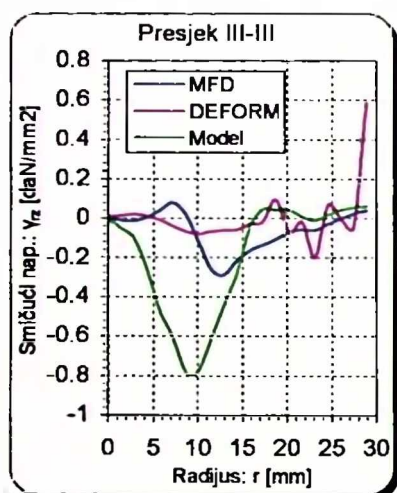
Slika 8.49. Obodni napon σ_θ [daN/mm^2] u centralnoj tački plana dobijen MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII



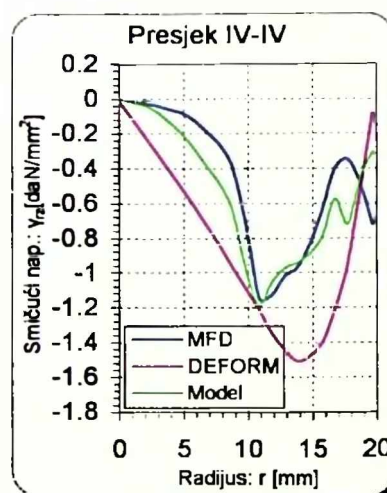
a)



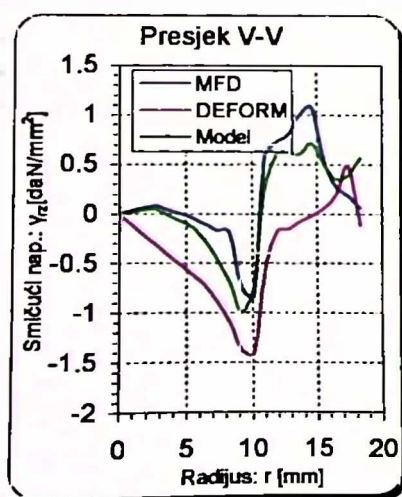
b)



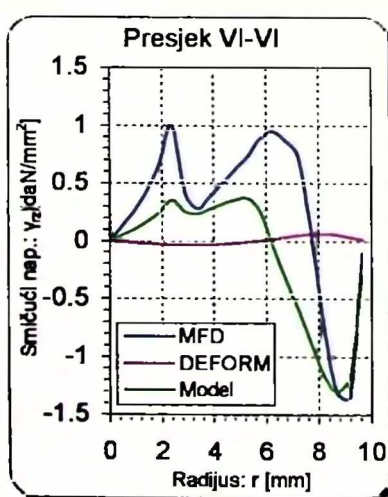
c)



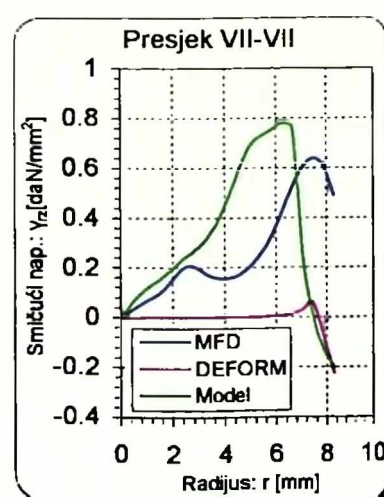
d)



e)

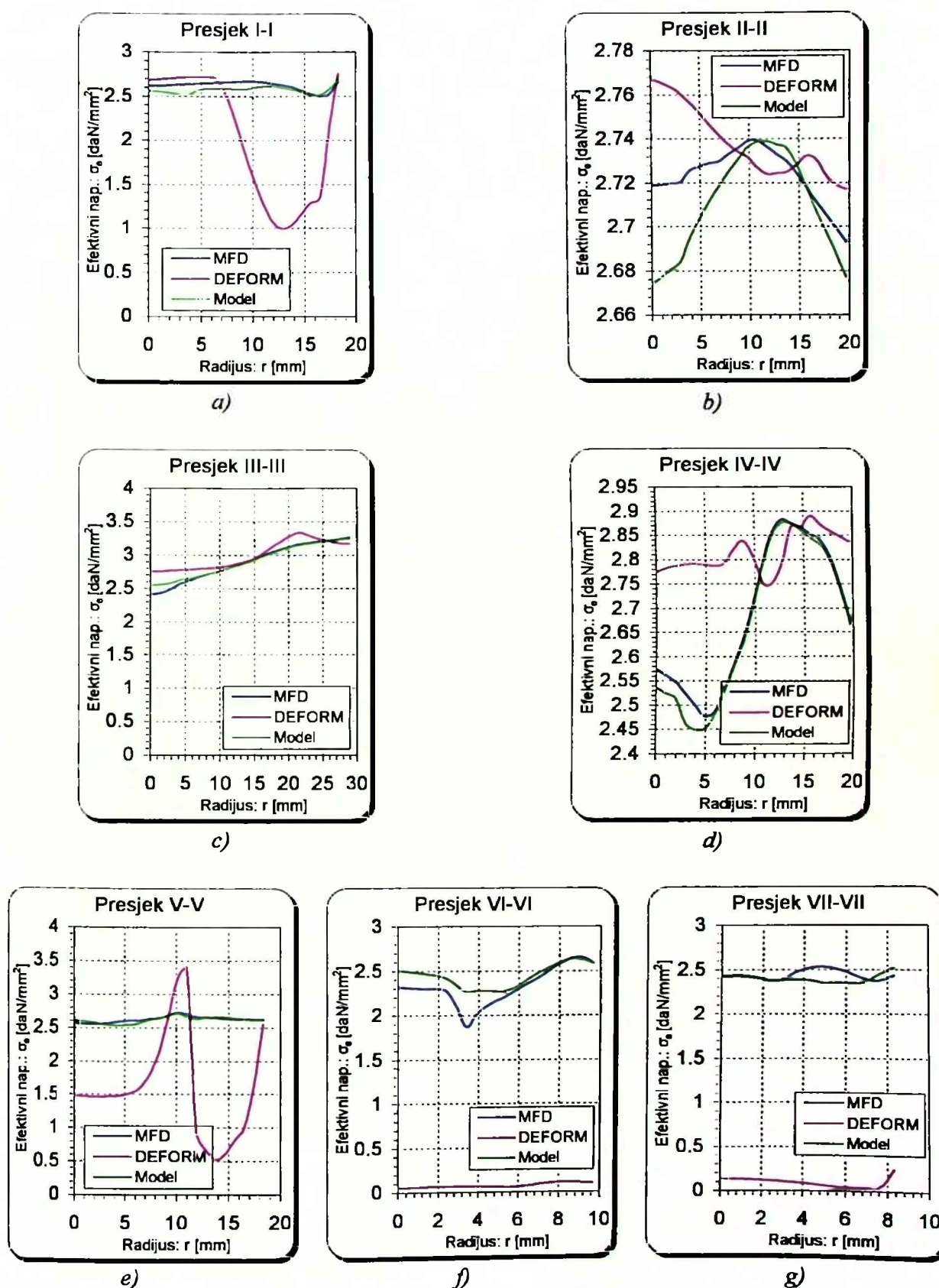


f)



g)

Slika 8.50. Smičući napon τ_{rz} [daN/mm²] u centralnoj tački plana dobijen MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII



Slika 8.51. Efektivni napon σ_e [daN/mm^2] u centralnoj tački plana dobijen MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII

8.4. ANALIZA DEFORMACIONIH SILA

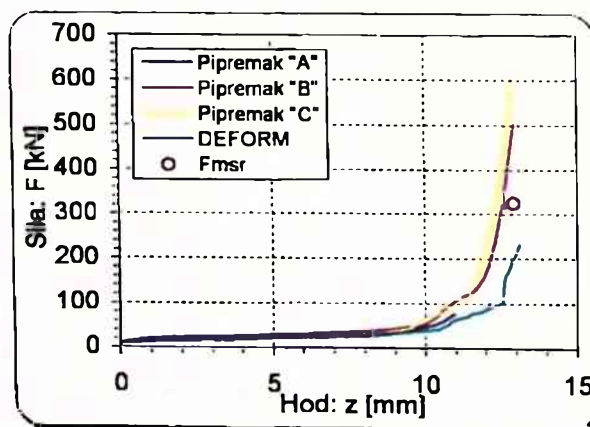
Poznavanje naponskog stanja u meridijalnoj ravni obradka predstavlja mogućnost određivanja deformacione sile, kao veličine koja se, na relativno jednostavan način, može mjeriti sa visokom tačnošću i poslužiti za ocjenu tačnosti naponsko deformacione analize. Deformaciona sila se određuje kao rezultanta sila od komponenti napona koje imaju projekciju na pravac dejstva sile. U ovom slučaju, to je pravac z-ose, a komponente napona su aksijalni - σ_z i smičući - τ_{rz} napon. Deformaciona sila se računa kao integral po površini promjene komponente napona po kontaktu materijala obradka i alata [113,118]:

$$F_m = \int_A \sigma_z dA + \int_A \tau_{rz} dA. \quad (8.1)$$

Naponsko stanje na kraju procesa deformisanja je određeno u svim tačkama eksperimentalnog plana MFD i pomoću izraza (8.1) izračunata je maksimalna deformaciona sila. Posebno su izračunate sile koje se javljaju na gornjem - $F_g^{(MFD)}$ i donjem - $F_d^{(MFD)}$ kalupu, pri čemu je za promjenu komponenta napona uzet diskretan skup vrijednosti u kontaktnim tačkama koji je aproksimiran kubnom interpolacijom. Dobijene vrijednosti maksimalne deformacione sile su date u Tabeli 8.1. Na osnovu zakona o statičkoj ravnoteži tijela, sile dobijene za gornji i donji kalup bi trebalo da su jednake, međutim, javljaju se izvesna odstupanja zbog računskih grešaka. Ova odstupanja su relativno mala, što predstavlja pokazatelj da su određene sa zadovoljavajućom tačnošću.

Kao mjerodavna deformaciona sila sračunata na osnovu naponskog stanja obradka dobijenom MFD, uzima se srednja maksimalna sila kao aritmetička vrijednost sila na gornjem i donjem kalupu: $F_{msr}^{(MFD)}$, koja je takođe data u Tabeli 8.1. U tabeli su date, radi poređenja, još i deformacione sile dobijene eksperimentom za segmentni - $F_{mB}^{(E)}$ i kompaktni pripremak - $F_{mC}^{(E)}$, sile na gornjem i donjem kalupu sračunate pomoću izraza (8.1) na osnovu naponskog stanja dobijenog DEFORM simulacijom: $F_{mg}^{(D)}$ i $F_{md}^{(D)}$ i deformaciona sila dobijena DEFORM simulacijom - $F_m^{(D)}$.

Deformacione sile dobijene tokom procesa deformisanja segmentnih pripremak A i B, kompaktnog priprema C i DEFORM simulacijom, kao i srednja maksimalna deformaciona sila sračunata na bazi naponskog stanja dobijenog MFD, u centralnoj tački pana eksperimenta broj 34, date su na Slici 8.52. Sile u ostalim tačkama plana eksperimenta date su u Prilogu P.2.



Slika 8.52. Deformacione sile u funkciji hoda dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom i maksimalna deformaciona sila dobijena MFD za centralnu tačku plana

8. Analiza i poređenje rezultata zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima

Tabela 8.1. Maksimalne deformacione sile dobijene MFD, eksperimentalno i DEFORM simulacijom

N ^o	F _{mg} ^(MFD) [kN]	F _{md} ^(MFD) [kN]	F _{msr} ^(MFD) [kN]	F _{mr} ^(E) [kN]	F _{mc} ^(E) [kN]	F _{mg} ^(D) [kN]	F _{md} ^(D) [kN]	F _{msr} ^(D) [kN]
1	349.185	329.363	339.274	324.800	342.000	260.078	256.625	257.367
2	343.506	333.636	338.571	327.000	299.000	246.224	242.614	253.752
3	320.216	307.827	314.022	315.000	323.000	283.556	276.944	276.320
4	310.298	300.711	305.504	257.300	251.100	252.070	246.270	243.511
5	491.517	470.102	480.809	522.000	502.000	269.224	261.121	252.420
6	486.341	468.693	477.517	476.554	515.000	275.571	269.568	263.269
7	449.349	434.061	441.705	433.411	403.560	179.743	179.676	182.325
8	430.976	430.235	430.606	478.692	417.000	290.571	286.723	296.692
9	299.831	295.388	297.610	384.000	356.000	241.880	239.831	239.281
10	304.935	279.034	291.985	323.000	305.000	243.061	238.400	237.305
11	285.889	259.658	272.774	334.000	324.000	188.709	191.988	256.397
12	245.586	235.872	240.729	336.000	371.000	183.696	180.694	176.320
13	439.964	414.144	427.054	366.000	363.000	245.618	243.341	249.149
14	420.658	398.485	409.571	474.000	437.000	271.445	264.282	261.240
15	353.202	357.218	355.210	341.000	336.000	198.777	193.247	200.924
16	361.285	341.413	351.349	316.000	329.000	198.646	196.427	195.188
17	312.814	295.498	304.156	-	360.000	233.173	225.983	230.287
18	307.713	298.820	303.266	-	327.000	234.144	230.631	245.656
19	287.870	276.970	282.420	-	296.000	233.920	231.519	232.454
20	279.553	271.005	275.279	-	233.000	227.219	220.859	213.2571
21	443.509	424.203	433.856	-	461.000	259.774	252.219	256.1883
22	438.411	422.370	430.390	-	448.000	257.735	257.498	250.9017
23	405.461	391.648	398.554	-	404.000	160.530	161.060	163.7937
24	388.255	387.342	387.799	-	417.000	257.508	252.024	247.9609
25	271.578	267.393	269.485	-	295.000	223.873	221.869	219.6524
26	273.825	251.259	262.542	-	249.000	229.175	223.186	225.3326
27	256.567	232.730	244.648	-	290.000	179.285	177.418	195.2751
28	219.750	213.295	216.522	-	345.000	189.628	179.966	179.5373
29	395.710	372.864	384.287	-	332.000	209.386	207.721	214.0029
30	380.632	360.591	370.612	-	410.000	244.618	235.996	229.8183
31	317.622	320.433	319.028	-	335.000	184.637	182.262	189.9698
32	325.793	308.075	316.934	-	252.000	182.267	179.304	178.4906
33	327.772	301.354	314.563	344.000	330.000	245.524	239.993	233.1786
34	324.321	326.473	325.397	354.000	342.000	-	-	-
35	325.609	315.316	320.462	318.000	305.000	-	-	-
36	317.059	313.162	315.111	321.000	308.000	-	-	-

Analizom vrijednosti deformacionih sila datih u Tabeli 8.1. i dijagrama na Slici 8.52 i slikama u Prilogu P.2., može se reći da se maksimalne deformacione sile sračunate na osnovu naponskih stanja dobijenih MFD bolje poklapaju sa eksperimentalnim podacima za segmentne pripremlje B i kompaktne pripremlje C, nego sile dobijene DEFORM simulacijom. Maksimalne vrijednosti su dobijene u tački 5 eksperimentalnog plana, tj. za gornje nivoe faktora x_1 i x_2 i donji nivo varijacije faktora x_3 . Sa smanjenjem faktora x_4 i faktora temperature x_5 ove vrijednosti rastu.

Kao provjera ispravnosti računanja vrijednosti maksimalne deformacione sile na osnovu naponskog stanja služe vrijednosti sračunate za gornji i donji kalup na osnovu naponskog stanja dobijenog DEFORM simulacijom. Dobijene vrijednosti se dobro poklapaju sa vrijednostima DEFORM simulacije, što predstavlja potvrdu ispravnosti određivanja deformacione sile.

8.5. ANALIZA NAPONSKO DEFORMACIONIH PARAMETERA DOBIJENIH MODELIRANJEM

Regresionom analizom svih naponsko deformacionih parametara dobijenih MFD, po principu "*Point by Point*", u posmatranim tačkama meridijalne ravni, određeni su parametri modela sa kvadratnom funkcijom odziva, na osnovu kojih su dobijeni dijagrami promjene. Poređenjem modelski dobijenih vrijednosti i vrijednosti dobijenih MFD uočava se da postoji izvjesno odstupanje u centralnoj tački plana eksperimenta. Ovo odstupanje je posledica ponavljanja u centralnoj tački plana, pri čemu su dobijeni rezultati koji se međusobno razlikuju, za iste uslove deformisanja, što predstavlja disperziju rezultata usled neponovljivosti postupka. S obzirom da je planom eksperimenta izvršeno ponavljanje četiri puta u centralnoj tački plana, to se vrijednosti dobijene modeliranjem poklapaju sa aritmetičkom sredinom vrijednosti dobijenih MFD.

9. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

U okviru obrade deformisanjem, svojom složenošću se posebno izdvaja zapreminsko deformisanje u otvorenim kalupima. Područje ispitivanja parametara deformisanja u funkciji geometrijskih i termomehaničkih faktora kod ovog deformisanja nedovoljno istraženo i samim tim, veoma aktuelno. Za uspješnu primjenu obrade deformisanjem potrebno je detaljno poznavanje naponsko deformacionog stanja obradka u toku procesa. Iz naponsko deformacionog stanja mogu se dobiti osnovni parametri procesa: deformaciona sila, deformacioni rad, specifični pritisak na alat, kao i ocjena obradivosti materijala. Složenost problematike uslovljava neophodnost korišćenja sprege teorijskog, eksperimentalnog i, u novije vrijeme, numeričkog pristupa.

Ovaj rad predstavlja doprinos određivanju naponsko deformacionog stanja obradka kod procesa zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima. U nastavku se kratko izlažu bitni elementi sadržaja rada.

U Poglavlju 3. najprije je dat kraći pregled najosnovnijih pojmova kakvi su: naponi, deformacije i brzine deformacija. Iako, praktično, ne postoji udžbenik iz oblasti obrade deformisanjem u kojem ovi pojmovi nijesu u manjoj ili većoj mjeri obrađeni, činjenica da je njihov pregled urađen na bazi više literaturnih izvora, govori o postojanju razlika u interpretaciji i oznakama, što je unificirano i usklađeno za korišćenje u radu. Pored toga, dati su pregledi teorije plastičnog tečenja i metoda visioploastičnosti za određivanje naponskog stanja obradka, kontaktnog trenja, krivih ojačavanja i metoda konačnih elemenata.

Eksperimentalna istraživanja su opisana u Poglavlju 4. i konceptijski, obavljena su u tri faze. Prve dvije faze odnose se na osnovne ulazne parametre u obradi deformisanjem i to:

- kotaktne uslove izražene preko koeficijenta/faktora trenja i
- specifični deformacioni otpor u vidu krivih ojačavanja.

Treća faza odnosi se na istraživanja naponsko deformacionih parametara klase osnosimetričnih djelova, koji su značajno zastupljeni u zapreminskom deformisanju u otvorenim kalupima. Kako je ova klasa veoma raznovrsna, izvršena su istraživanja familije stepenastih djelova sa dva nivoa sa gornje i jednim nivoom sa donje strane podione ravni. Kao ispitivani materijal koristi se legura aluminijuma $AlMgSi0,5$ koja je domaće proizvodnje, iz neposrednog industrijskog okruženja i veoma često korišćena u procesima zapreminske obrade deformisanjem, prije svega u procesima istiskivanja i deformisanja u otvorenim kalupima. U dijelu istraživanja korišćeno je i olovo, kao modelski materijal deformisanja legure aluminijuma u toplom stanju. Iako su istraživanja vršena u laboratorijskim uslovima, u skladu sa objektivnim mogućnostima, težnja je bila usmjerena na što veću podudarnost sa proizvodnim uslovima, pa je usvojeno sledeće:

- ispitivanje je realizovano na temperaturama tople obrade u intervalu $t=(420\div 460)$ [°C],
- deformisanje je ostvareno konstantnom brzinom deformisanja: $v=2$ [mm/s],
- vršeno je podmazivanjem grafitnom mašću.

S obzirom da na proces deformisanja u otvorenim kalupima utiče relativno veliki broj faktora, teško ih je sve obuhvatiti i istražiti njihov uticaj na brojne izlazne veličine. Iz tog razloga su, na osnovu preliminarnih istraživanja, utvrđeni relevantni ulazni parametri. To su:

- osnovni geometrijski parametri kalupa i priprema (relativno definisani radi mogućnosti generalizovanja dobijenih rezultata) i
- termomehanički parametri (temperatura, stepen deformacije, koeficijent trenja i napon tečenja).

Izlazne veličine istraživane u radu su parametri naponsko deformacionog stanja koji podrazumijevaju komponente tenzora: napona, deformacija i brzina deformacija. Takođe je istraživana i deformacionu silu kao parametar procesa, na osnovu kojeg se vrši verifikacija dobijenih rezultata. Eksperiment je organizovan saglasno modernom višefaktornom ortogonalnom planu sa variranjem faktora na dva nivoa varijacije i ponavljanjem u centralnoj tački plana.

Eksperimentalna istraživanja su vršena na istraživačkom radnom mjestu za obradu deformisanjem, u Laboratoriji Instituta Mašinskog fakulteta u Podgorici. Mašina za obradu deformisanjem je hidraulička presa (R100), koja se koristi i za ispitivanja na istezanje. Tu su još i uređaji i mašine koji služe za zagrijavanje i pripremu materijala i alata. Presa je opremljena analogno digitalnom mjernom opremom povezanom u informacioni mjerni sistem, pomoću koje se na računaru dobijaju visokoprecizni digitalizovani rezultati mjerenja deformacione sile u funkciji radnog hoda.

Za izvođenje eksperimentalnih istraživanja i za pripremu materijala izrađeni su odgovarajući alati. Izrada priprema od olova je vršena na alatima za istosmjerno istiskivanje. Alati za zapreminsku obradu deformisanjem na temperaturama tople obrade legure aluminijuma AlMgSi0,5 su napravljeni od alatnog čelika za rad u toplom stanju. Izvedeni su tako da se pokretni djelovi kreću u cjevastoj vodiči, formirajući na taj način zatvorenu komoru koja istovremeno služi za održanje postojanosti temperature. Ovaj način obezbjeđenja izoternosti procesa se pokazao veoma uspješnim. Isti alati se koriste i za obradu u hladnom stanju. To su ravni alati za slobodno sabijanje i kalupi za zapreminsko deformisanje u otvorenim kalupima. Ravni alati su monolitni, a kalupi se sastoje od segmenata. Pojedini segmenti kalupa predstavljaju ploče odgovarajućih dimenzija, koje se odnose na pojedine nivoe kalupa, u skladu sa vrijednostima zahtijevanim planom eksperimenta. Ploče se vijcima povezuju sa osnovnom pločom u jednu cjelinu, formiraju unutrašnju konturu zahtijevanog oblika i dimenzija.

Numerička simulacija metodom konačnih elemenata danas ima široku primjenu i sve više dobija na popularnosti, iz sledećih razloga:

- razvoja računarske opreme,
- povećanja jednostavnosti korišćenja,
- smanjenja vremena pripreme podataka,
- razvoja korisničkih *interface*-a u *windows* okruženju i
- dobijanja širokog spektra izlaznih informacija.

Ipak, i pored svega toga postoje izvesna ograničenja u primjeni, naročito kod 3D problema, gdje, još uvijek, nije postignuta ekonomska opravdanost korišćenja.

Do danas je razvijen određen broj softverskih paketa za numeričke simulacije metodom konačnih elemenata u oblasti velikih - plastičnih deformacija, koji se međusobno razlikuju po svojoj uspješnosti. Jedan od najboljih programskih paketa za numeričku FEM simulaciju procesa deformisanja je DEFORM paket instalisan na računarskoj opremi Mašinskog fakulteta u Podgorici, korišćen za numeričke simulacije u ovoj Disertaciji.

Određivanje koeficijenta/faktora trenja i analiza dobijenih rezultata izvršeni su u Poglavlju 5., a teorijske osnove u Poglavlju 3. Korišćen je metod sabijanja prstena ("*Ring Test*"), a ispitivanja su vršena za sve definisane uslove eksperimenta. Eksperimentalno dobijene vrijednosti stepena deformacije visine u funkciji stepena deformacije unutrašnjeg prečnika unijete su u kalibracione dijagrame po sledećim autorima:

- *Male-Cockcroft* (koeficijent trenja μ),
- *Lee-Altan* (faktor trenja m),
- *Liu* (faktor trenja m),
- *Wanheim-Danckert* (faktor trenja m - za idealno plastičan materijal) i
- *Wanheim-Danckert* (faktor trenja f , koeficijent trenja μ - za materijal koji deformaciono ojačava).

Vrijednosti koeficijenta/faktora trenja određene su i na osnovu teorijskih izraza poznatih iz literature. Takođe su dobijeni i kalibracioni dijagrami na osnovu DEFORM simulacije, pri čemu ulazni podaci sadrže sve relevantne parametre, a faktor trenja se mijenja i za pojedine vrijednosti dobijaju kalibracione krive.

Određivanje vrijednosti koeficijenta/faktora trenja na osnovu kalibracionih dijagrama po različitim autorima vršeno je tako što se procijeni interval vrijednosti eksperimentalno dobijene krive i kao mjerodavna, uzima se sredina procijenjenog intervala. Sa DEFORM kalibracionih dijagrama je moguće veoma precizno odrediti koeficijent/faktor trenja, zbog postojanja numeričkih vrijednosti kalibracionih krivih. Mjerodavna vrijednost se dobija za vrijednost minimuma definisane funkcije odstupanja eksperimentalno dobijenih krivih, od krivih sa kalibracionog dijagrama, dobijenih DEFORM simulacijom za različite vrijednosti faktora trenja m .

Krive ojačavanja (KO) ispitivanih materijala su određene u Poglavlju 6. za pojedine definisane uslove, sledećim metodima:

- metod izražene zone deformacije (MIZOD),
- metod sabijanja hidrodinamičkim trenjem (SHT),
- Šofmanov metod (ŠM),
- uprošćeni metod (UM) i
- metod jednoosnog zatezanja (MJZ).

Primijenjene su metodologije i standardi propisani za pojedine metode, obrađeni u Poglavlju 5. Izvršena je regresiona analiza dobijenih krivih ojačavanja, i određeni parametri modela stepenog oblika u funkciji logaritamskog stepena deformacije, a za leguru AlMgSi0,5 u toplom stanju i temperature. Takođe, regresionom analizom, su dobijeni parametri modela ekvivalentne krive ojačavanja, koja predstavlja srednju vrijednost krivih dobijenih na osnovu više metoda.

Osnova za određivanje naponsko deformacionih parametara u tačkama zapremine obradka jeste poznavanje pomjeranja tačaka. Kada je u pitanju osnosimetrično deformisanje dovoljno je poznavati pomjeranja tačaka obradka u meridijalnoj ravni. Pomjeranja tačaka u Disertaciji su određena na osnovu priprema izrađenih od osnosimetričnih žljebastih pločica, koji se ponašaju identično kao kompaktni pripremi, opterećeni naponskim stanjem koje vlada tokom procesa presovanja u otvorenim kalupima (Poglavlje 3.). Dakle, u pitanju su fizički diskretizovani pripremi/obradci, pa je metod nazvan metodom fizičke diskretizacije (MFD).

Nakon procesa deformisanja, skidanjem jedne polovine obradka do ose simetrije, finim poliranjem i nagrivanjem 10% rastvorom NaOH, uočava se jasno izražena deformisana mreža, koja se sastoji od kontura žljebastih pločica, pogodna za digitalizaciju i dalju računarsku obrdu. Određivanja pomjeranja čvornih tačaka mreže i na osnovu njih deformacionih parametara, a takođe i kinematskih i naponskih parametara, dato je u Poglavlju 7. Kinematski parametri su određeni na osnovu brzina pomjeranja, koje su dobijene na osnovu pomjeranja i vremena trajanja dovoljno kratkog intervala deformisanja. Komponente napona su određene na bazi deformacionih i kinematskih parametara metodom visioplastičnosti.

Vrijednosti svih naponsko deformacionih i kinematskih parametara su određeni u svim tačkama eksperimentalnog plana, što je automatizovano pomoću odgovarajućih programa napisanih u MATLAB-u. Izvršena je i regresiona analiza rezultata i dobijeni su parametri njihovih modela sa kvadratnom funkcijom odziva, a takođe i numerička DEFORM simulacija metodom konačnih elemenata. Analiza i poređenje rezultata izvršeni su u Poglavlju 8., gdje je dobijen veliki broj zaključaka koji se odnose na ponašanje svih parametara u meridijalnoj ravni obradka, pa se ovdje neće ponavljati.

A. Na osnovu istraživanja kontaktnog trenja, izvode se sledeći zaključci:

1. Oblik krivih promjene stepena deformacije unutrašnjeg prečnika u funkciji stepena deformacije visine dobijenih eksperimentalno, u izvjesnoj mjeri odstupa od krivih na kalibracionim dijagramima. Odstupanja oblika su veća za veće vrijednosti

- koeficijenta/faktora trenja. To znači da ne postoje kalibracioni dijagrami univerzalnog karaktera, pomoći kojih se dobijaju apsolutno tačne vrijednosti i važe za sve uslove deformisanja.
2. Analizom dobijenih vrijednosti koeficijenta/faktora za različite uslove deformisanja zaključuje se da one međusobno odstupaju. Na osnovu analize i ocjene dobijenih vrijednosti, može se zaključiti na koji način, u odgovarajućim uslovima mogu se dobiti najbolji rezultati.
 3. Vrijednosti faktora trenja, dobijene na osnovu DEFORM kalibracionih dijagrama, praktično predstavljaju srednju vrijednost rezultata dobijenih po različitim autorima i mogu biti primijenjeni u svim definisanim uslovima deformisanja, pa su u ovom radu korišćene upravo ove vrijednosti faktora trenja m .
 4. Bilo bi uputno da se za numeričke simulacije procesa zapreminskog deformisanja, odrede kalibracioni dijagrami za konkretne uslove, pomoću raspoloživog softverskog paketa i na osnovu eksperimenta dođe do mjerodavnih vrijednosti koeficijenta/faktora trenja.
- B. Analizom rezultata određivanja KO, izvode se sledeći zaključci:
1. Na osnovu razlika dobijenih krivih ojačavanja, zaključuje se da korišćene metode nijesu apsolutno tačne, nego sa izvjesnim odstupanjem od relnih vrijednosti daju promjenu napona tečenja u funkciji logaritamskog stepena deformacije, za određene uslove. To je posledica nemogućnosti eliminisanja uticaja kontaktnog trenja i postizanja jednoosnog naponskog stanja, odnosno, tačnosti rešavanja prostornog naponskog stanja.
 2. Generalno, teško je reći koji metod je najtačniji. Za ozbiljnija istraživanja potrebno je imati što tačnije podatke svih ulaznih parametara procesa deformisanja, a naročito napona tečenja. Iz tog razloga se prihvata određivanje krivih ojačavanja na osnovu više metoda i vrši upoređenje i ocjena dobijenih rezultata za određene uslove deformisanja.
 3. Kvantitativno kvalitativnu analizu krivih ojačavanja pogodno je vršiti na procesu slobodnog sabijanja, upoređenjem deformacionih sila izmjenjenih eksperimentalno i određenih DEFORM simulacijom, korišćenjem krivih ojačavanja dobijenih različitim metodima i njihovih regresivnih modela. Deformacionu silu je moguće na relativno jednostavan način mjeriti sa visokom tačnošću. Takođe, proces slobodnog sabijanja je relativno jednostavan proces zapreminskog deformisanja, sa aspekta korišćenih alata i izrade priprema.
 4. Na osnovu verifikacije krivih ojačavanja korišćenjem numeričkim DEFORM simulacija procesa slobodnog sabijanja pri navedenim uslovima, zaključuje se najbolje koristiti krivu ojačavanja po MSHT, za hladnu obradu i UM za toplu obradu. Dobro poklapanje rezultata se postiže i korišćenjem modelakrivih ojačavanja po navedenim metodima.
 5. Bolje poklapanje deformacionih sila dobijenih eksperimentalno i DEFORM simulacijama je pri korišćenju modelskih KO. Ovo je posledica toga što modeli eliminišu negativne uticaje nesavršenosti metoda za određivanje KO.
 6. Na samom početku procesa slobodnog sabijanja, pri malim vrijednostima stepena deformacije, bolje poklapanje deformacionih sila se postiže pri korišćenju eksperimentalno dobijenih krivih ojačavanja. Poznavanje tačne vrijednosti deformacione sile na samom početku procesa deformisanja je od manjeg značaja za analizu, pa se zbog jednostavnosti unošenja ulaznih podataka kod numeričkih simulacija prihvata korišćenje modelskih vrijednosti krivih ojačavanja.
 7. Korišćenjem modela ekvivalentnih krivih ojačavanja, koje predstavljaju srednje krivu ojačavanja, pri numeričkim DEFORM simulacijama procesa slobodnog sabijanja za uslove deformisanja date u ovom radu, dobijeni su najtačniji rezultati, pa su navedeni modeli korišćeni kod simulacija zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima.

- C. Na osnovu analize dobijenih parametara naponsko deformacionog stanja zapreminskog deformisanja u otvorenim kaluima, izvode se sledeći zaključci:
1. Kod svih deformacionih, kinematskih i naponskih parametara jasno se izdvajaju dvije zone vrijednosti i to:
 - zona koja odgovara unutrašnjem dijelu kalupa - zona kalupa i
 - zona vijenca.bilo da su dobijeni MFD, bilo DEFORM simulacijom.
 2. Normalne komponente logaritamskog stepena deformacije i efektivne logaritamske deformacije dobijene MFD i DEFORM simulacijom, imaju sličan karakter promjene i vrijednosti istog reda veličine. Osnovna razlika je što se ekstremne vrijednosti dobijaju za maksimalnu vrijednost radijusa kod MFD, dok kod DEFORM simulacije na približno jednoj četvrtini vijenca, osim kod obodne logaritamske deformacije, kod koje je maksimum na kraju vijenca.
 3. Kod deformacionih komponenata iz prethodnog zaključka, dobijenih MFD i DEFORM simulacijom, dobijaju se približno iste ekstremne vrijednosti u blizini prelaza gornjeg i donjeg kalupa. Međutim, u blizini prelaza prvog u drugi nivo gornjeg kalupa, DEFORM simulacijom se dobijaju ekstremne vrijednosti, dok kod MFD one nijesu prisutne. Ovo se dešava zbog relativno grube mreže na mjestu sa velikom geometrijskom nelinearnošću, pa aproksimacija površi pomjeranja u čvornim tačkama mreže nije dovoljna. U tačkama eksperimentalnog plana u kojima se čvorna tačka mreže približno poklapa sa tačkama maksimalne nelinearnosti, i MFD takođe daje ekstremne vrijednosti.
 4. Smičuća komponenta deformacije dobijena MFD ima ekstremne vrijednosti po sredini vijenca i to maksimum na donjoj, a minimum na gornjoj strani. DEFORM simulacijom se dobija nestabilna promjena ove komponente u zoni vijenca, dok se u zoni kalupa dobijene vrijednosti relativno dobro poklapaju.
 5. Radijalna, aksijalna i efektivna brzina deformacije, dobijene DEFORM simulacijom, imaju ujednačenu, veoma nisku apsolutnu vrijednost u zoni kalupa, a ekstremna vrijednost im je istog reda veličine i nalazi se na prvoj četvrtini kalupa. Obodna brzina deformacije ima za red veličine nižu ekstremnu vrijednost navedenih komponenata i nalazi se na kraju vijenca.
 6. Kod komponenata brzina deformacija pomenutih u prethodnom zaključku, dobijenih MFD, ekstremne vrijednosti se dobijaju na kraju vijenca, stim što su nižeg reda veličine kod aksijalne i obodne brzine deformacije. U zoni kalupa su dobijene niske vrijednosti normalnih komponenata i efektivne brzine deformacije.
 7. Kod smičuće brzine deformacije je identična situacija kao kod smičuće deformacije, stom razlikom što su MFD dobijene ekstremne vrijednosti u zoni vijenca za red veličine manje od vrijednosti dobijenih DEFORM simulacijom.
 8. Dobijene komponente brzina deformacija DEFORM simulacijom i MFD imaju niske vrijednosti u zoni kalupa, jer se posmatra završetak procesa deformisanja, kada je materijal popunio kompletnu gravuru, gdje nema više deformacije, osim isticanja u vijenac. U tačkama plana eksperimenta gdje materijal nije popunio čitavu gravuru (drugi nivo gornjeg kalupa), raspored brzina deformacija se razlikuje zbog intenzivnog tečenja materijala u aksijalnom pravcu. Ovaj efekat kod MFD nije izražen zbog relativno dugog posmatranog intervala na kraju procesa deformisanja, jer se radi sa srednjim vrijednostima brzina pomjeranja na tom intervalu.
 9. Normalne komponente napona dobijene DEFORM simulacijom i MFD su negativne, što znači da je obradak opterećen naponskim stanjem na pritisak. Minimalne apsolutne vrijednosti su dobijene za maksimalnu vrijednost radijusa u zoni vijenca, a u zoni kalupa DEFORM simulacijom su dobijene ujednačene vrijednosti. Kod MFD u zoni

kalupa apsolutne vrijednosti normalnih komponenata napona opadaju sa porastom radijusa, a ujednačene su po visini. Normalne komponente napona odstupaju u tačkama u kojima materijal ne popunjava kompletnu gravuru kalupa, jer odgovarajuće komponente, normalne na slobodnu površinu, imaju vrijednost efektivnog napona u tačkama slobodne površine.

10. Smičući naponi dobijeni MFD i DEFORM simulacijom se dobro poklapaju, i za red veličine su manji od normalnih komponenata napona, pa nemaju većeg uticaja na efektivni napon i deformacionu silu.
 11. Deformacione sile u pojedinim tačkama plana eksperimenta, na kraju procesa deformisanja, računaju se kao integrali naponskih komponenata koje imaju projekciju na osu obradka, po kontaktnoj površini obradka i alata. One predstavljaju veličinu koja se na relativno jednostavan i tačan način može eksperimentalno mjeriti i uporediti sa deformacionom silom sračunatom na osnovu naponskih stanja dobijenih MFD i DEFORM simulacijom. Maksimalne vrijednosti dobijene MFD se bolje poklapaju sa eksperimentalno izmjerenim od vrijednosti dobijenih DEFORM simulacijom.
 12. Razlike u rezultatima dobijenim MFD i DEFORM simulacijom su prije svega posledica razlika načina određivanja parametara. Kod MFD deformacije su određivane po modelu malih deformacija za čitav proces deformisanja, pa iz tog razloga nastaje greška kod komponenti deformacija koje se dobijaju kao parcijalni izvodi pomjeranja po presjeku u meridijalnoj ravni. S druge strane, napravljena fizička diskretizacija, relativno je gruba na mjestima visoke geometrijske nelinearnosti, tako da se interpolacijom pomjeranja između čvorova mreže ne dobija njihova adekvatna promjena.
 13. Numeričkom DEFORM simulacijom metodom konačnih elemenata pored diskretizacije obradka vrši se i diskretizacija procesa na inkremente, pa se za svaki inkrement određuju komponente i kumulativnom sumom dobija konačna logaritamska deformacija. Međutim i pored toga, usled različitih pojednostavljenja u matematičkom aparatu MKE dolazi do određenih grešaka, koje ne odgovaraju realnom stanju, a manifestuju se, prije svega, u slabijem popunjavanju kalupa u određenim tačkama plana eksperimenta i nestabilnosti pojedinih deformacionih parametara za više stepene deformacije i nepoklapanja deformacione sile sa eksperimentalno dobijenim vrijednostima.
 14. Poređenjem vrijednosti svih naponsko deformacionih parametara dobijenih MFD i modeliranjem "*Point by Point*" korišćenjem modela sa kvadratnom funkcijom odziva, čiji su parametri dobijeni regresionom analizom sa visokim stepenom korelacije, uočava se da postoji izvjesno odstupanje u vrijednostima. Ovo odstupanje je posledica ponavljanja u centralnoj tački plana, pri čemu se dobijeni rezultati međusobno razlikuju, za iste uslove deformisanja, što predstavlja disperziju rezultata usled neponovljivosti postupka. S obzirom da je u planu eksperimenta izvršeno četvorostruko ponavljanje u centralnoj tački plana, to se vrijednosti dobijene modeliranjem poklapaju sa aritmetičkom sredinom vrijednosti dobijenih MFD.
 15. Istraživanja predstavljaju tipski primjer, a analogijom se mogu sprovesti i za druge familije osnosimetričnih djelova koje se dobijaju zapreminskim deformisanjem u otvorenim kalupima.
- D. Na osnovu svega izloženog proističu pravci daljih istraživanja:
1. Razvijeni metod fizičke diskretizacije za naponsko deformacionu analizu procesa zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima osnosimetričnih djelova, nije konačan i predstoji njegovo dalje usavršavanje. Usavršavanjem metoda postiže se veća tačnost dobijenih parametara.

2. Usavršavanje metoda odnosi se, prije svega, na smanjenje dimenzija žljebova pločica za izradu segmentnih priprema. Ovo je moguće postići daljim razvojem tehnologije rezanja pločica i izrade sitnijih češljastih noževa za rezanje.
3. Diskretizacijom procesa deformisanja u otvorenim kalupima i određivanja naponsko deformacionih parametara u svim fazama, takođe se povećava tačnost dobijenih rezultata. U tom slučaju, komponente tenzora logaritamskih deformacija se određuju na osnovu pomjeranja po fazama. Ukupna logaritamska deformacija predstavlja sumu logaritamskih deformacija dobijenih za pojedine faze deformisanja.
4. Povećanjem tačnosti određivanja naponsko deformacionih parametara moguće je smanjiti posmatrani interval deformisanja za određivanje komponenata brzina deformacija. Brzine pomjeranja dobijene sa većom tačnošću, vode ka povećanju tačnosti brzina deformacija i napona.
5. Analizom vrijednosti naponsko deformacionih parametara u centralnoj tački plana, zaključuje se da se za iste uslove deformisanja dobijaju rezultati koji imaju izvjesno međusobno odstupanje. To je posledica nehomogenosti procesa i pojave anizotropije deformacija, pa se nameće potreba statističke obrade podataka. To znači da se za iste uslove, proces deformisanja u otvorenim kalupima izvodi na uzorku određenog broja priprema. Statističkom obradom po nekoj od poznatih raspodjela, došlo bi se do vrijednosti parametara sa najvećom vjerovatnoćom.
6. Primijenjena metodologija određivanja naponsko deformacionog stanja, uz određenu korekciju i adaptaciju, može biti primjenjivana i na neosnosimetrične otkovke. To podrazumijeva odgovarajuću razradu tehnologije dobijanja žljebastih pločica za izradu segmentnih priprema. U tom slučaju žljebaste pločice ne bi mogle biti radene tehnologijom rezanja na strugu, već na drugim mašinama, npr. glodalici ili rendisaljci.
7. Takođe, primijenjena metodologija fizičkog modeliranja zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima, može biti korišćena i u drugim procesima zapreminskog deformisanja, npr. kod slobodnog sabijanja, istosmjernog i suprotnosmjernog istiskivanja, pa čak i kod valjanja, izradom priprema pravougaone osnove. Pri tome treba voditi računa o osobenostima pojedinih postupaka koje mogu dovesti do izvjesnih ograničenja. Kod istosmjernog istiskivanja može doći do određenih defekata (*Piping Defect*, *Chavron Defect*), usled pojave istežućih napona u pravcu istiskivanja. Kod ispitivanja metodom fizičke diskretizacije, istežući naponi dovode do razdvajanja pločica segmentnih priprema.
8. Metod fizičke diskretizacije moguće je primijeniti na rešavanje praktičnih industrijskih problema. Metod je naročito pogodan kada je u pitanju familija djelova istog ili sličnog oblika sa varijacijom geometrijskih parametara, koji se uzimaju u obzir odgovarajućim planiranjem eksperimenta.
9. Rezultati prezentirani u ovom radu predstavljaju bazu podataka i bazu znanja mogućeg ekspert sistema za automatsko projektovanje tehnologije zapreminskog deformisanja u otvorenim kalupima. Baza podataka i baza znanja se mogu stalno dopunjavati novim podacima i znanjem dobijenim u daljim istraživanjima.



LITERATURA

- [1] ABAQUS - Standard User's Manual. ABAQUS, Inc.
- [2] Alexandrov S.: An Analysis of the Axisymmetric Compression of Viscous Materials. *Journal of Materials Processing Technology* 105 (2000) 278-283.
- [3] Altan T., Thomas W., Vazquez V., Koç M.: Simulation of Metal Forming Processes - Application and Future Trends. Keynote paper, Plenary Session II, Advanced tech of Plast. Vol. I, Proc. of the 6th ICTP, 1999.
- [4] Altan T., Ngaile G., Shen g.: Cold and Hot Forging - Fundamentals and Applications. ERC/NSM, Ohio, 2004.
- [5] Altan T., Hannah D.: Prediction and Elimination of Defects in Cold Forging Using Process Simulation. R&D Update, Forging, (<http://www.ercnsm.org>) 2002.
- [6] Altan T., Vazquez V.: Numerical Process Simulation for Tool and Process Design in Bulk Metal Forming. Keynote Paper for STC-(F) for CIRP General Assembly 1996, Como, Italy.
- [7] Altman H. C., Slagter W.: Quality of Sumulation Packages for Flashless Hot Forging Operations. *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications*, Mori (ed.), Swets & Zeitlinger, Lisse, 2001.
- [8] Arentoft M., Henningsen P., Bay N., Wanheim T.: Simulation of Defects in Metal Forming - An Example. *Journal of Materials Processing Technology* 45 (1994) 527-532.
- [9] Arentoft M., Wanheim T.: The Basis for a Design Support System to Prevent Defects in Forging. *Journal of Materials Processing Technology* 69 (1997) 227-232.
- [10] Bang W., Lee C. S., Chang Y. W.: Finite Element Analysis of Hot Forging with Flow Softening by Dinamic Recrystalliyation. c
- [11] Bay N.: Friction Stress and Normal Stress in Bulk Metal Forming Processes. *Journal of Mechanical Working Technology*, 14 (1987) 203-223.
- [12] Bay N., Gerved G.: Tool/Workpiece Interface Stresses in Sample Upsetting. *Journal of Mechanical Working Technology*, 14 (1987) 263-282.
- [13] Bramley A., N., Mynors D. J.: The use of Forging Simulation Tools. *Mterials and Design*. 21 (2000) 279-286.
- [14] Brčić V., Čukić R.: Eksperimentalne metode u projektovanju konstrukcija. Građevinska knjiga, Beograd, 1988.
- [15] Button S., T.: Numerical Simulation and Phisical Modeling as Educational Tools to Teach Metal Forming Processes. *Internationa Conference on Engineering and Computer Education - ICECE 2000*, Sao Paolo.
- [16] Caporali A., Gileno L. A., Button S. T.: Expertsystem for hot forging design. *Journal of Materials Processing Technology* 80-81 (1998) 131-135.
- [17] Cavaliere M., Gomez G., Gazzarri J. I., Perez T., Dvorkin E. N.: Experimental Procedure for Determining "Tree Stress - True Strain" Curves for Steels in the High Temperature Range and Under Controlled Deformation Rate. *European Congress on Computational Methods in /applied Sciences and Engineering - ECCOMAS 2000*, Barcelona.
- [18] Chenot J.L., Fourment L., Mocellin K.: Numerical Treatment of Contact and Friction in FE Simulation of Forming Processes. *Journal of Materials Processing Technology* 125-126 (2002) 45-52.

- [19] Cho H., Ngaile G., Altan T.: Simultaneous Determination of Flow Stress and Interface Friction by Finite Element Based Inverse Analysis. CIRP General Assembly, Montreal, Canada, 2003.
- [20] Crisfield M. A.: Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. John Wiley & Sons Ltd., England, 1991.
- [21] Čaušević M.: Teorija plastične prerade metala. Svjetlost, Sarajevo, 1979.
- [22] Čaušević M.: Teorija plastične prerade metala. Svjetlost, Sarajevo, 1979.
- [23] Danckert J., Wanheim T.: Analysis of the Ring Test Method for the Evaluation of Frictional Stresses in Bulk Metal Forming Processes. Annals of the CIRP, Vol. 37/1/1988.
- [24] Danckert J., Wanheim T.: The Use of a Square Grid as an Alternative to a Circular Grid in the Determination of Strains. Journal of Mechanical Working Technology, 3 (1979) 5-15.
- [25] DEFORM Manual - SFTC
- [26] Devedžić B.: Plastičnost i obrada metala deformisanjem. Naučna knjiga, Beograd, 1992.
- [27] Domazetović V., Vukčević M., Janjić M.: Modeling of the Die Forging Processes. International Conference on Industrial Tools - ICIT '97, Maribor, Slovenia, 1997.
- [28] Domazetović V., Vukčević M., Janjić M.: Research of the Working Pressure and Change of Geometry in the Forging Deformation. Nove trendy v strojanstve na prahu tretieho tisícročia, Košice, Slovakia, 1997.
- [29] Domazetović V., Vukčević M., Janjić M.: Prilog istraživanju zapreminskog deformisanja primjenom metoda diskretizacije. 27. savjetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Niš, 1998.
- [30] Domazetović V., Vukčević M., Mijanović M.: Prilog određivanju naponsko-deformacionog stanja krupnih otkovaka. XVII Savjetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Budva, 1983.
- [31] Domazetović V., Vukčević M., Marković M., Mrkić M.: Ispitivanje slobodnog sabijanja uzoraka od Al-legure na hidrauličnoj presi. VIII Seminar BIAM, Zagreb, 1986.
- [32] Domazetović V., Janjić M.: Analiza deformacionog stanja odkovka tokom odvijanja procesa deformacije. XIX JUPITER Konferencija, Prohor Pčinjski, 1993.
- [33] Domazetović V., Janjić M.: Analiza naponsko-deformacionog stanja pri kovanju priprema za prstenove. Teška mašinogradnja - TM '93, Vrnjačka Banja, 1993.
- [34] Domazetović V., Janjić M.: Istraživanje stepena usaglašenosti teorijskih i eksperimentalnih vrijednosti radnih pritisaka kod slobodnog sabijanja. 25 Savjetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Beograd, 1994.
- [35] Domazetović V., Janjić M., Pejović P.: Deformaciona analiza pri kovanju zatvarača zasuna. Metalurgija '94, Budva, 1994.
- [36] Domazetović V., Janjić M.: Analiza napona i radnog pritiska kod slobodnog sabijanja Al-trupaca. XXI JUPITER Konferencija, Beograd, 1995.
- [37] Domazetović V., Janjić M., Zogović S.: Modeliranje radnog pritiska pri presovanju osnosimetričnih elemenata u otvorenim kalupima. 26. međunarodno savjetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Budva, 1996.
- [38] Domazetović V., Vukčević M., Janjić M.: Upoređenje teorijskih i eksperimentalnih pritisaka pri zapreminskom oblikovanju osnosimetričnih elemenata u otvorenim kalupima. 26. međunarodno savjetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Budva, 1996.
- [39] Domazetović V., Vukčević M., Janjić M.: Određivanje krivih ojačavanja uprošćenim metodom primjenom informacionog mjernog sistema. XXII JUPITER Konferencija, Beograd, 1997.
- [40] Duta A., Rao A. V.: Simulation of Isothermal Forging of Compressor Disc by Combined Numerical and Physical Modelling Techniques. Journal of Materials Processing Technology 72 (1997) 392-395.

-
- [41] Đukić V., Majstorović A.: Mašinski materijali - uputstva za ispitivanja. Naučna knjiga, Beograd, 1980.
- [42] Евстратов В. А.: Теория обработки металлов давлением. Вища школа, Харьков, 1981.
- [43] Fujikawa S., Ishihara A.: Development of Expert Systems for Forging Processes. Society of Automotive Engineers of Japan - JSAE Review 18 (1997) 127-133.
- [44] Ghosh A., Mallik A. K.: Manufacturing Science. Ellis Horwood Limited, England, 1986.
- [45] Gierzynska D. M., Lacki p.: Some Aspect of Modelling of Metal Forming Processes. Computers and Structures, 2003.
- [46] Грудев А. П., Эильберг Ю. В., Тилик В. Т.: Трение и смазки при обработке металлов давлением. Металлургия, Москва, 1982.
- [47] Han H.: The Validity of Mathematical Models Evaluated by Two-specimen Method Under the Unknown Coefficient of Friction and Flow Stress. Journal of Materials Processing Technology 122 (2002) 386-396.
- [48] Hannah D., Altan T.: Improving the Accuracy of FEM Simulations Though Accurate Measurement of Material Properties. R&D Update, Forging, (<http://www.ercnsm.org>) 2002.
- [49] Hartley P., Pillinger I., Sturgess C.: Numerical Modelling of Material Deformation. Springer-Verlag, London, 1992.
- [50] Huang G., Wertheimer T.: Bulk Metal Forming Simulation Using MSC.SuperForm. Virtual Product Development Conference, Dearborn, Michigan, 2003.
- [51] Исаченков Е. И.: Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением. Машиностроение, Москва, 1978.
- [52] James G.: Advanced Modern Engineering Mathematics. Addison-Wesley, England, 1999.
- [53] Janjić M., Vukčević M., Domazetović V.: Axisymetrical Element Contour Modelling at Die Forging. Journal for Technology of Plasticity, Vol. 22, Number 1-2, Novi Sad, 1997.
- [54] Janjić M., Vukčević M., Domazetović V.: Primjena metode diskretizacije u deformacionoj analizi odpreska. XXIV JUPITER Konferencija, Zlatibor, 1998.
- [55] Janjić M., Vukčević M.: Die Forging Procesess Deformation Analysis. International Conference on Industrial Tools - ICIT '99, Maribor, Slovenia, 1999.
- [56] Janjić M., Vukcevic M., Hartley P.: Comparing of Modeling Metal Forming Processes by Finite Element Method and Experimental-Theoretical Discretization Method.: First National Conference on Recent Advances in Mechanical Engineering - ASME Greek Section, Patras, Greece, 2001.
- [57] Janjić M., Domazetović V., Vukčević M.: Slobodno sabijanje - eksperiment i simulacija. XXVIII JUPITER Konferencija, Beograd, 2002.
- [58] Janjić M., Domazetović V., Vukčević M.: Određivanje specifičnog deformacionog otpora metodom konačnih elemenata. XXIX JUPITER Konferencija, Beograd, februar 2003.
- [59] Janjić M., Domazetović V., Vukčević M.: Određivanje faktora trenja metodom konačnih elemenata. XXX JUPITER Konferencija, Beograd, april 2004.
- [60] Janjić M., Domazetović V., Vukčević M.: Experimental-Numerical Determination of Factor Friction. 31st Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Leeds, UK, 2004.
- [61] Janjić M., Domazetović V., Savićević S., Vukčević M.: Određivanje krivih ojačavanja i njihov izbor u numeričkim simulacijama. XXXI JUPITER Konferencija, Zlatibor, 2005.
- [62] Janjić M.: Prilog modeliranju tečenja metala pri zapreminskom oblikovanju osnosimetričnih elemenata - Magistarski rad. Mašinski fakultet, Podgorica, 1997.
- [63] Janjić M., Domazetović V.: Naponsko deformaciona analiza sa osvrtom na tehnologiju izrade prstenova. Monografija povodom 25 godina studija mašinstva u Crnoj Gori, Podgorica, 1996.
-

- [64] Jeong D. J., Kim D. J., Kim J. H., Kim B. M., Dean T. A.: Effect of Surface Treatments and Lubricants for Warm Forging Die Life. *Journal of Materials Processing Technology* 113 (2001) 544-550.
- [65] Kalajdžić M. Č. Metod konačnih elemenata. Institut za alatne mašine i alate, Beograd, 1978.
- [66] Kalpakjian S.: *Manufacturing Engineering and Technology*. Addison-Wesley Publishing Company, USA 1992.
- [67] Колмогоров В. Л.: Механика обработки металлов давлением. "Металлургия, Москва, 1986.
- [68] Кроха В. А.: Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. Машиностроение, Москва, 1979.
- [69] Kwak D. Y., Cheon J. S., Kim S. Y., Lee G. A., Im Y. T.: Development of Automated Simulation System for Forming. *AFDM'99*, Haeundae, Pusan, Korea, 1999.
- [70] Lee C. H., Altan T.: Influence of the Flow Stress and Friction Upon Metal Flow in Upset Forging of Rings and Cylinders. *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, pp 775-782, 1972.
- [71] Liu J. Y.: An Analysis of Deformation Characteristics in Interfacial Friction Conditions in Simple Upsetting of Rings. *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, Vol. 94, No 4, pp 1149-1156, 1972.
- [72] Liu J. Y., Baker T. N.: Deformation Characteristics of IMI685 titanium alloy under β Isothermal Forging Conditions. *Materials Science and Engineering, A* 197 (1995), pp. 125-131.
- [73] Макушок Е. М., Белый Д. И., Дмитриевич Д. И., Калиновская Т. В., Красневский С. М., Масаковская А. С.: Инженерная теория пластичности. Наука и техника, Минск, 1985.
- [74] Male A. T., Cockcroft M. G.: A Method for the Determination of the Coefficient of Friction Under Condition of Bulk Plastic Deformation. *Journal of the Institute of Metals*. Vol. 93, pp 38-46. 1964.
- [75] Mandić V.: Fizičko modeliranje i numerička simulacija kao osnova novog koncepta projektovanja alata za toplu zapreminsku obradu - Doktorska disertacija. Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2002.
- [76] Markus P., Otto-Karl H., Janjić M.: The Yield Stress and Friction Coefficient Influence in Upsetting Process. *Teška mašinogradnja - TM 2002*, Kraljevo, 2002.
- [77] Markus P., Otto-Karl H., Janjić M.: Zylinderstauchen - versuch und simulation. *BHM*, 147. Jg. 2002.
- [78] Markus P., Otto-Karl H., Janjić M.: Eksperiment i simulacija slobodnog sabijanja. *Časopis "Tehnika"*, br. 4-5, Beograd, 2002.
- [79] Mišković B., Mišković N.: Fizičko modeliranje procesa plastične prerade metala i legura. Tehnološko-metalurški fakultet, Savez inženjera metalurgije Jugoslavije, Beograd, 1996.
- [80] Mišović M.: Istraživanje kriterijuma stabilnog tečenja metala u procesu hladnog izvlačenja čeličnih šipki. Doktorska disertacija, Titograd, 1987.
- [81] Musafija B.: Primijenjena teorija plastičnosti, Univerzitet u Sarajevu, Sarajevo, 1973.
- [82] Musafija B.: Obrada metala plastičnom deformacijom. Svjetlost, Sarajevo, 1972.
- [83] Охрименко Я. М., Тюрин В. А.: Неравномерность деформации при ковке. Машиностроение, Москва, 1969.
- [84] O'Kane J. F., Spenceley J. R., Taylor R.: Simulation as an Essential Tool for Advanced Manufacturing Technology Problems. *Journal of Materials Processing Technology* 107 (2000) 412-424.
- [85] Oskada K., Kawasaki T., Taniguchi N.: A Method of Determining Flow Stress Under Forging Conditions. *CIRP Annals*, 1981.

- [86] Parteder E., Buenten R.: Determination of Flow Curves by Means of a Compression Test Under Sticking Friction Conditions Using an Iterative Finite-Element Procedure. *Journal of Materials Processing Technology* 74 (1998) 227-233.
- [87] Pešić M.: Prerada metala u plastičnom stanju. Izdavačko-informativni centar studenata, Beograd, 1975.
- [88] Petersen S. B., Martins P. A. F., Bay N.: Friction in Bulk Metal Forming: a General Friction Model vs. the Law of Constant Friction. *Journal of Materials Processing Technology*, 66 (1997), pp 186-194.
- [89] Petruška J., Janiček L.: Computationally-Experimental Workability Determination of Compressed Cylindrical Specimen with Surface Defect. *Journal of Materials Processing Technology* 80-81 (1998) 572-578.
- [90] Pietrzyk M.: Finite-Element Simulation of Large Plastic Deformation. *Journal of Materials Processing Technology* 106 (2000) 223-229.
- [91] Plančak M., Vilotić D., Vujović V., Trbojević I., Skakun P., Milutinović M.: Praktikum laboratorijskih vježbi iz tehnologije plastičnosti. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1997.
- [92] Plančak M.: Naponsko-deformaciono stanje u procesima hladnog istiskivanja čelika. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 1984.
- [93] Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М.: Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. *Металлургия*, Москва, 1983.
- [94] Quantor Ltd. & Forge Technology Inc.: Forge Fair 2000, Columbus, Ohio, USA.
- [95] Ramakrishnan N., Singh K. M., Suresh R. K. V., Srinivasan N.: An Algoritam Based on Total-Elastic-Incremental-Plastic strain for Large Deformation Plasticity. *Journal of Materials Processing Technology* 86 (1999) 190-199.
- [96] Rojek J., Zienkiewicz O. C., Oñate E., Postek E.: Advances in FE explicit formulation for simulation of metalforming processes. *Journal of Materials Processing Technology* 119 (2001) 41-47.
- [97] Roque C. M. O. L., Button S. T.: Application of the Finite Element Method in Cold Forging Processes. *J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences*, Vol. XXII, No 2, pp. 189-202, 2000.
- [98] Ryan N. D., McQueen H. J.: Flow stress, dynamic restoration, Strain hardening and ductility in hot working of 361 Steel. *Jour. of Material Proc. Tech.*, 21 (1990), pp 177-200.
- [99] Saiki H., Marumo Y., Minami A., Sonoi T.: Effect of the Surface on the Resistance to Plastic Deformation of a Hot Forging Tool. *Journal of Materials Processing Technology* 113 (2001) 22-27.
- [100] Saluja S.S., Pandey P. C., Dalela S.: A Simple Method for Flow Stress Deformation Under Metalworking Condition. *SME Manuf. Eng. Trans.* Vol. 9, Dearborn, 1981.
- [101] Sekulović M.: Metod konačnih elemenata. *Grđevinska knjiga*, Beograd, 1984.
- [102] Shabaik A. H., Vujović V.: On the Stress Formability Index. *Internationa Conference on Mechanical Design and Production*, Cairo, 1988.
- [103] Shabaik A.: Analysis of Forming Processes: Experimental and Numerical Methods. *Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineering*, 1978.
- [104] Shabaik A., Thomsen E. G.: Some Aditonal Studies of the Mechanics of of Axisymetric Extrusion by the Vosioplasticity Method. *CIRP*, 16 (1968) 41-48.
- [105] Shabaik A., Kobayashi S.: Computer Application to the Visioplasticity Method. *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, pp 339-346, 1967.
- [106] Смирнов-Аляев Г. А.: Сопротивление материалов пластическому деформированию. *Машиностроение*, Москва, 1978.
- [107] Snape G., Clift S., Bramley A.: Parametric Sensitivity Analises for FEA of Hot Steel Forging. *Journal of Materials Processing Technology* 125-126 (2002) 353-360.

- [108] Sowerby R., Chu E., Duncan J. L.: Determination of Large Strains in Metal Forming. *Journal of Strain Analysis*, Vol. 17 No 2 1982.
- [109] Stanić J.: Metod inženjerskih mjerenja. Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
- [110] Stanić J.: Tehnološki mjerni sistemi. Mašinski fakultet, Beograd, 1988.
- [111] Stanković Lj., Uskoković Z.: PC MATLAB. Epsilon-Montex, Titograd, 1991.
- [112] Stone E. R. H., Cai J., Hu Z. M., Dean T. A.: An Exercise in Cold Ironing as the Post-Forging Operation for Net-shape Manufacture. *Journal of Materials Processing Technology* 6371 (2002) 1-6.
- [113] Сторожев М. В., Попов Е. А.: Теория обработки металлов давлением. Машиностроение, Москва, 1977.
- [114] Stuart B. B., Kwon H. K., Lallit A.: An Internal Variable Constitutive Model for Hot Working of Metals. *International Journal of Plasticity*, Vol. 5, pp. 95-130, USA, 1989.
- [115] Šljivić M.: Tehnologija plastičnosti I. Univerzitet u Banja Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, 1998.
- [116] Шофман Л. А.: Теория и расчёты процессов холодной штамповки. Машиностроение, Москва, 1969.
- [117] Tan X.: Comparisons of Friction Models in Bulk Metal Forming. *Tribology International*, 35 (2002) 385-393.
- [118] Тарновский И. Я., Поздеев А. А., Ганаго О. А.: Деформации и усилия при обработке металлов давлением. Машгиз, Москва, 1959.
- [119] Terzić P.: Ispitivanje metala - mehanička ispitivanja. Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1986.
- [120] Тихомиров В. Б.: Планирование и анализ эксперимента. Легкая индустрия, Москва, 1974.
- [121] Tomov B. I., Gadov V. I.: Modelling and Description of the Near-net-shape Forging of Cylindrical Spur Gears. *Journal of Materials Processing Technology* 92-93 (1999) 444-449.
- [122] Tomov B., Minev R., Radev R., Gagov V.: About Input Data for the FEM Analysis of Bulk Forming. *Journal of Materials Processing Technology* 133 (2003) 199-202.
- [123] Турчин А. М.: Электрические измерения неэлектрических величин. Издательство "Энергия", Москва, 1966.
- [124] Унксов Е. П., Джонсон У., Колмооров В. Л., Попов Е. А., Сафаров Ю. С., Вентер Р. Д., Кудо Х., Осакада К., Пью Х. Л. Д., Соуерби Р.: Теория пластических деформаций металлов. Машиностроение, Москва, 1983.
- [125] Vazquez V., Altan T.: Measurement of Flow Stress and Critical Damage Value in Cold Forging. *International CIRP Workshop on Friction and Flow Stress in Cutting and Forming*, Priz, Jan. 26/26 (2000) 167-174.
- [126] Vujović V.: Tehnologija plastičnosti u mašinstvu. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1990.
- [127] Vujović V., Shabaik A. H.: A New Workability Criterion for Ductile Metals. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 108 (1986) 245-249.
- [128] Vujović V., Plančak M., Vilotić D., Shabaik A. H.: Forming limit investigation by Means of Stress Formability Index. *Advanced Technology Plasticity*, (1990) 1305-1310.
- [129] Vujović V.: Deformabilnost - Monografija. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1992.
- [130] Vukčević M., Domazetović V.: Prilog ispitivanju specifičnog deformacionog otpora Al-legure. 18. Savjetovanja proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Niš 1984.
- [131] Vukčević M., Domazetović V.: Prilog ispitivanju koeficijenta trenja pri toplom sabijanju cilindričnih uzoraka od Al-legure. 21. savjetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Opatija 1987.

- [132] Vukčević M., Contribution to numerical modeling of rigid-plastic body deformation, International simposium of CAD/CAM, Zagreb, 1989.
- [133] Vukčević M., Hartley P.: Elastic-plastic Finite-Element in Metal Forming Analysis, Journal for Technology of Plasticity, N 1-2, 1993.
- [134] Vukčević M., Hartley P.: Modeliranje osnosimetričnih problema zapreminskog deformisanja metodom konačnih elemenata, Tehnika N 8-9, 1994.
- [135] Vukčević M.: Metod konačnih elemenata u analizi procesa zapreminskog deformisanja, XIX Jupiter konferencija, Prohor Pčinjski, 1993.
- [136] Vukčević M., Hartley P., Pillinger I., Sturgess C. E. N.: Finite Element Modelling of Forging Processes, Report, University of Birmingham, 1992.
- [137] Vukčević M.: Prilog ispitivanju specifičnog deformacionog otpora al-legure - metod izražene zone deformacije - Magistarski rad. Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd. 1984.
- [138] Vukčević M., Janjić M., Domazetović V.: Uticaj geometrijskih parametara pri deformisanju osnosimetričnih uzoraka u otvorenim kalupima. XXVI JUPITER Konferencija, Beograd, 2000.
- [139] Vukčević M., Janjić M.: On Modeling the Metal Forming Processes. Journal for Technology of Plasticity, Vol. 25, Number 1-2, Novi Sad, 2000.
- [140] Vukčević M., Hartley P., Domazetović V., Janjić M.: Trodimenzionalno modeliranje procesa deformisanja metodom konačnih elemenata. 28. savjetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Kraljevo - Mataruška Banja, 2000.
- [141] Vukčević M., Bulatović M., Janjić M.: Conntour Modeling of the Die Forging Processes. International Association for Management of Technology - IAMOT, Miami Beach, Florida, USA, 2002.
- [142] Vukčević M., Savićević S., Janjić M.: FEM and Experimental Contour Modelling at Die Forging, Conference Advanced Engineering and Techology. Sevastopol, Ukraina, 2004.
- [143] Vukčević M.: Uvod u proizvodne tehnologije I. Izdavački centar "Cetinje", Podgorica, 1994.
- [144] Wanheim T., Bay N., Petersen A. S.: A Theretically determined model for friction in meatl working processes. Wear, 28 (1974) 251-258.
- [145] Wifi A. S., Abdel-Hamid A., El-Monayri H., El-Abbasi N.: Finite Element Determination of Workability Limits for Disks and Rings Under Different Upsetting Conditions. Journal of Materials Processing Technology 56 (1996) 918-932.
- [146] Wilson F. W., Harvey P. D., Gump C. B.: Die Design Handbook. American Society of Tool and Manufacturing Engineering, 1965.
- [147] Wong S. F., Hodgson P. D., Thomson P. F.: Room Temperature Deformation and Recrystalization Behavior of Lead-tin Alloys in Torsion and Plane Strain Compression. Materials Sci. and Tech., 15 (1999), pp. 689-696.
- [148] Wong S. F., Hodgson P. D., Thomson P. F.: Room Temperature Deformationand Recrystallisation Behavior of Lead and Lead-tin Alloys in Torsion and Plane Strain Compression. Materials Science and Technology, 15 (1999) 689-696.
- [149] Xinbo L., Fubao Z., Zhiliang Z.: Determination of Metal Material Flow Stress by the Method of C-FEM. Journal of Materials Processing Technology 120 (2002) 144-150.

Spisak slika

Slika 3.1.	Naponsko stanje elementarnog paralelopipeda	11
Slika 3.2.	Elementarni djelić u cilindričnom koordinatnom sistemu	12
Slika 3.3.	Elementarni paralelopiped u ravni xOy	13
Slika 3.4.	Prstenasti pripremak za određivanje koeficijenta/faktora trenja: a) prije i b) u toku procesa deformisanja	22
Slika 3.5.	Male-Cockcroft kalibracioni dijagram za koeficijent trenja μ	23
Slika 3.6.	Lee-Altan kalibracioni dijagram za faktor trenja m	23
Slika 3.7.	Liu kalibracioni dijagram za faktor trenja m	232
Slika 3.8.	Wanheim-Danckert kalibracioni dijagram za faktor trenja m kod idealno plastičnog materijala	23
Slika 3.9.	Wanheim-Danckert kalibracioni dijagram za faktor trenja m kod materijala koji deformaciono ojačava	23
Slika 3.10.	Pripremak za MIZOD: a) sa središnjim dijelom i b) bez središnjeg dijela	25
Slika 3.11.	Epruveta za MSHT	26
Slika 3.12.	Kriva promjene pritiska u funkciji stepena deformacije	27
Slika 3.13.	Promjena pritiska u funkciji odnosa D/h	28
Slika 3.14.	Sabijanje cilindra između paralelnih ploča	28
Slika 3.15.	Element u blizini srednjeg presjeka	29
Slika 3.16.	Popravni koeficijent kod UM	30
Slika 3.17.	Epruveta za ispitivanje istezanjem prema JUS C.A4.002	31
Slika 3.18.	Različiti tipovi materijalne nelinearnosti: a) Elasto-plastični, b) Kruto-plastični, c) Elasto-viskoplastični, d) Kruto-viskoplastični	33
Slika 3.19.	Glavni "interface" DEFORM-2D sistema	36
Slika 3.20.	Pre-processor DEFORM-2D sistema	36
Slika 3.21.	Post-processor DEFORM-2D sistema	38
Slika 4.1.	Obradak u zahvatu sa kalupom	39
Slika 4.2.	Hidraulična presa: 1 - noseći stubovi, 2 - donji sto, 3 - gornji sto, 4 - stezne čeljusti, 5 - zavojno vreteno za pozicioniranje donjeg stola, 6 - navrtka, 7 - hidraulični cilindar, 8 - hidraulični klip, 9 - nosači gornjeg stola, 10 - induktivni davač hoda, 11 - davači sile	42
Slika 4.3.	Fotografija istraživačkog mjesta: 1 - hidraulična presa, 2 - laboratorijska peć, 3 - otpornički davači sile, 4 - induktivni davač hoda, 5 - mjerni most, 6 - prenosna jedinica, 7 - računar sa A/D karticom, 8 - mjerno regulacioni uređaj prese	43
Slika 4.4.	Blok dijagram informacionog mjernog sistema	43
Slika 4.5.	Sklop alata za istosmjerno istiskivanje olovnih šipki: 1 - matrica, 2 - tiskač, 3 - cjevasta vođica, 4 - materijal koji se istiskuje, 5 - držač matrice, 6 - gornji sto prese, 7 - hidraulični cilindar prese	45
Slika 4.6.	Sklop alata za deformisanje u otvorenim kalupima: 1 - gornji kalup, 2 - donji kalup, 3 - odpresak, 4 - tiskač, 5 - cjevasta vođica, 6 - ravna ploča, 7 - donji sto prese, 8 - hidraulični cilindar	45
Slika 4.7.	Segmentni klupi za rad u toplom stanju: a) gornji kalup i b) donji kalup	46
Slika 4.8.	Različiti pokušaji izvedbe segmentnih pripremak	50
Slika 4.9.	Segmentni pripremak od žljebastih pločica	50
Slika 4.10.	Karakteristične dimenzije pločica	51
Slika 4.11.	Fotografija reznog alata za izradu žljebastih pločica	51

Slika 4.12. Krajnje žljebaste pločice: a) početna i b) završna.....	51
Slika 4.13. Spajanje pločica u matrici: 1 - pritiskač (hidraulički cilindar), 2 - tiskač, 3 - matrica, 4 - žljebaste pločice, 5 - osnovna ploča.....	51
Slika 4.14. Signal hoda u funkciji vremena sa induktivnog davača u centralnoj tački plana broj 18.....	53
Slika 4.15. Signal sile u funkciji vremena sa jednosg otporničkog davača u centralnoj tački plana broj 18.....	53
Slika 4.16. Sila u funkciji hoda prese u centralnoj tački plana broj 18.....	53
Slika 4.17. Digitalizovana slika presjeka obradka u centralnoj tački eksperimentalnog plana broj 18.....	54
Slika 4.18. Usvojeni koordinatni sistem.....	54
Slika 4.19. Digitalizovana slika presjeka priprema za prečnike: a) $d_{0min}=30.28$ [mm], b) $d_{0sr}=33.56$ [mm], c) $d_{0max}=36.3$ [mm].....	54
Slika 5.1. Funkcija odstupanja stepeni deformacije za olovo bez podmazivanja.....	72
Slika 5.2. Funkcija odstupanja stepeni deformacije za olovo sa podmazivanjem.....	72
Slika 5.3. Koeficijenti trenja - μ za razne uslove deformisanja.....	74
Slika 5.4. Faktori trenja - m za razne uslove deformisanja.....	74
Slika 6.1. Sila sabijanja priprema (a) kod MIZOD-a za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C].....	78
Slika 6.2. Kriva ojačavanja po MIZOD-u za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C].....	78
Slika 6.3. Krive ojačavanja po MIZOD-u za ostale uslove deformisanja.....	78
Slika 6.4. Sila sabijanja kod MSHT za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C].....	79
Slika 6.5. Kriva ojačavanja po MSHT-u za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C].....	79
Slika 6.6. Kriva ojačavanja po MSHT-u za olovo na $t=20$ [°C].....	79
Slika 6.7. Promjene sila sabijanja kod ŠM za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C].....	80
Slika 6.8. Promjene radnog pritiska kod ŠM za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C].....	80
Slika 6.9. Promjena pritiska od odnosa d/h kod ŠM za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C].....	80
Slika 6.10. Kriva ojačavanja po ŠM-u za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C].....	81
Slika 6.11. Krive ojačavanja po ŠM-u za ostale uslove deformisanja.....	81
Slika 6.12. Sila sabijanja kod UM-a za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C].....	82
Slika 6.13. Kriva ojačavanja po UM-u za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C].....	82
Slika 6.14. Krive ojačavanja po UM-u za ostale uslove deformisanja.....	82
Slika 6.15. Sila istezanja kod MJZ za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C].....	83
Slika 6.16. Nominalni i stvarni napon kod MJZ za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C].....	83
Slika 6.17. Kriva ojačavanja kod MJZ za AlMgSi0,5 na $T=20$ [°C].....	83
Slika 6.18. Krive ojačavanja kod MJZ za veće stepene deformacije.....	84
Slika 6.19. Krive ojačavanja za olovo na $t=20$ [°C].....	85
Slika 6.20. Krive ojačavanja za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C].....	85
Slika 6.21. Krive ojačavanja za AlMgSi0,5 na $t=420$ [°C].....	85
Slika 6.22. Krive ojačavanja za AlMgSi0,5 na $t=440$ [°C].....	85
Slika 6.23. Krive ojačavanja za AlMgSi0,5 na $t=460$ [°C].....	85
Slike 6.24. Aproksimativne KO za olovo na $t=20$ [°C].....	87
Slike 6.25. Aproksimativne KO za leguru AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C].....	87
Slike 6.26. Aproksimativne KO za leguru AlMgSi0,5 na $t=420$ [°C].....	87
Slike 6.27. Aproksimativne KO za leguru AlMgSi0,5 na $t=440$ [°C].....	87
Slike 6.28. Aproksimativne KO za leguru AlMgSi0,5 na $t=460$ [°C].....	88
Slika 6.29. Aproksimativna "površ" ojačavanja legure AlMgSi0,5 po MIZOD na $t=(420+460)$ [°C].....	88
Slika 6.30. Aproksimativna "površ" ojačavanja legure AlMgSi0,5 po ŠM na $t=(420+460)$ [°C].....	88

Slika 6.31. Aproximativna "površ" ojačavnja legure AlMgSi0,5 po UM na $t=(420\div 460)$ [°C].....	89
Slika 6.32. Ekvivalentna "površ" ojačavnja legure AlMgSi0,5 na $t=(420\div 460)$ [°C]	89
Slika 6.33. Sile dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom slobodnog sabijanja priprema od olova bez podmazivanja na $t=20$ [°C], korišćenjem: a) eksperimentalnih KO i b) modelskih KO	91
Slika 6.34. Sile dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom slobodnog sabijanja priprema od olova sa podmazivanjem na $t=20$ [°C], korišćenjem: a) eksperimentalnih KO i b) modelskih KO	91
Slika 6.35. Sile dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom slobodnog sabijanja priprema od legure AlMgSi0,5 bez podmazivanja na $t=20$ [°C], korišćenjem: a) eksperimentalnih KO i b) modelskih KO	91
Slika 6.36. Sile dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom slobodnog sabijanja priprema od legure AlMgSi0,5 sa podmazivanjem na $t=20$ [°C], korišćenjem: a) eksperimentalnih KO i b) modelskih KO	92
Slika 6.37. Sile dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom slobodnog sabijanja priprema od legure AlMgSi0,5 sa podmazivanjem na $t=420$ [°C], korišćenjem: a) eksperimentalnih KO i b) modelskih KO	92
Slika 6.38. Sile dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom slobodnog sabijanja priprema od legure AlMgSi0,5 sa podmazivanjem na $t=440$ [°C], korišćenjem: a) eksperimentalnih KO i b) modelskih KO	92
Slika 6.39. Sile dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom slobodnog sabijanja priprema d legure AlMgSi0,5 sa podmazivanjem na $t=460$ [°C], korišćenjem: a) eksperimentalnih KO i b) modelskih KO	93
Slika 7.1. Deformisane radijalne linije mreže na kraju procesa deformisanja	96
Slika 7.2. Deformisane aksijalne linije mreže na kraju procesa deformisanja	96
Slika 7.3. Programski generisana deformisana mreža	101
Slika 7.4. Programski generisana nedeformisana mreža	103
Slika 7.5. Pomjeranja presječnih tačaka deformisane mreže	103
Slika 7.6. Raspored posmatranih tačaka po presjeku obradka	107
Slika 7.7. Radijalna logaritamska deformacija: φ_r	110
Slika 7.8. Aksijalna logaritamska deformacija: φ_z	110
Slika 7.9. Obodna logaritamska deformacija φ_θ	110
Slika 7.10. Smičuća deformacija γ_r	110
Slika 7.11. Efektivna logaritamska deformacija φ_e	111
Slika 7.12. Deformisane radijalne linije mreže na početku posmatranog intervala	111
Slika 7.13. Deformisane aksijalne linije mreže na početku posmatranog intervala	111
Slika 7.14. Programski generisana deformisana mreža na početku posmatranog intervala	116
Slika 7.15. Vektori brzina pomjeranja u pojedinim tačkama presjeka	116
Slika 7.16. Radijalna brzina deformacije: $\dot{\epsilon}_r$ [s ⁻¹]	122
Slika 7.17. Aksijalna brzina deformacije: $\dot{\epsilon}_z$ [s ⁻¹]	122
Slika 7.18. Obodna brzina deformacije: $\dot{\epsilon}_\theta$ [s ⁻¹]	122
Slika 7.19. Smičuća brzina deformacije: $\dot{\gamma}_r$ [s ⁻¹]	122
Slika 7.20. Efektivna brzina deformacije: $\dot{\epsilon}_e$ [s ⁻¹]	122
Slika 7.21. Podintegralna funkcija jednačine viskoplastičnosti u [daN/mm ³] za presjek podione ravni	123

Slika 7.22. Neodređeni integral jednačine visioplastičnosti: $\Delta\sigma_{zv}+C_1$ [daN/mm ²], u presjeku podione ravni	123
Slika 7.23. Podintegralna funkcija druge jednačine ravnoteže u [daN/mm ³] za osu obradka	124
Slika 7.24. Neodređeni integral druge jednačine ravnoteže: $\Delta\sigma_{z0}+C_2$ [daN/mm ²], u osi presjeka.....	124
Slika 7.25. Integralna konstanta: C [daN/mm ²], u funkciji visine z	126
Slika 7.26. Aksijalni napon: σ_z [daN/mm ²].....	129
Slika 7.27. Radijalni napon: σ_r [daN/mm ²].....	129
Slika 7.28. Obodni napon: σ_θ [daN/mm ²].....	129
Slika 7.29. Smičući napon: τ_{rz} [daN/mm ²].....	129
Slika 7.30. Efektivni napon: σ_e [daN/mm ²]	129
Slika 7.31. Pripremak sa generisanom mrežom u zahvatu sa kalupima	131
Slika 7.32. Obradak zahvatu sa kalupima na kraju procesa deformisanja	131
Slika 7.33. Pomjeranja tačaka presjeka dobijena DEFORM simulacijom.....	131
Slika 7.34. Radijalna logaritamska deformacija dobijena DEFORM simulacijom	131
Slika 7.35. Aksijalna logaritamska deformacija dobijena DEFORM simulacijom	132
Slika 7.36. Obodna logaritamska deformacija dobijena DEFORM simulacijom.....	132
Slika 7.37. Smičuća deformacija dobijena DEFORM simulacijom	132
Slika 7.38. Efektivna deformacija dobijena DEFORM simulacijom.....	132
Slika 7.39. Brzine pomjeranja presjeka obradka dobijene DEFORM simulacijom	132
Slika 7.40. Radijalna brzina deformacije dobijena DEFORM simulacijom	132
Slika 7.41. Aksijalna brzina deformacije dobijena DEFORM simulacijom	133
Slika 7.42. Obodna brzina logaritamske deformacije dobijena DEFORM simulacijom	133
Slika 7.43. Smičuća brzina deformacije dobijena DEFORM simulacijom	133
Slika 7.44. Efektivna brzina deformacije dobijena DEFORM simulacijom.....	133
Slika 7.45. Radijalni napon dobijen DEFORM simulacijom.....	133
Slika 7.46. Aksijalni napon dobijen DEFORM simulacijom.....	133
Slika 7.47. Obodni napon dobijen DEFORM simulacijom	134
Slika 7.48. Smičući napon dobijen DEFORM simulacijom	134
Slika 7.49. Efektivni napon dobijen DEFORM simulacijom	134
Slika 8.1. Radijalna logaritamska deformacija u tački 2 eksperimentalnog plana.....	138
Slika 8.2. Radijalna logaritamska deformacija u tački 15 eksperimentalnog plana.....	138
Slika 8.3. Aksijalna logaritamska deformacija u tački 4 eksperimentalnog plana.....	139
Slika 8.4. Aksijalna logaritamska deformacija u tački 11 eksperimentalnog plana.....	139
Slika 8.5. Obodna logaritamska deformacija u tački 8 eksperimentalnog plana	139
Slika 8.6. Smičuća deformacija u tački 3 eksperimentalnog plana.....	140
Slika 8.7. Efektivna deformacija u tački 2 eksperimentalnog plana	140
Slika 8.8. 3D dijagram radijalne logaritamske deformacije φ_r u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom	141
Slika 8.9. 3D dijagram aksijalne logaritamske deformacije φ_z u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom	141
Slika 8.10. 3D dijagram obodne logaritamske deformacije φ_θ u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom	141
Slika 8.11. 3D dijagram smičuće deformacije γ_{rz} u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom	141
Slika 8.12. 3D dijagram efektivne logaritamske deformacije φ_e u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom	141
Slika 8.13. Karakteristični presjeci u meridijalnoj ravni obradka	142

Slika 8.14. Radijalna logaritamska deformacija φ_r u centralnoj tački plana broj 18, dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII	144
Slika 8.15. Aksijalna logaritamska deformacija φ_z u centralnoj tački plana broj 18, dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII	145
Slika 8.16. Obodna logaritamska deformacija φ_θ u centralnoj tački plana broj 18, dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII	146
Slika 8.17. Smičuća deformacija γ_{rz} u centralnoj tački plana broj 18, dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII	147
Slika 8.18. Efektivna logaritamska deformacija φ_e u centralnoj tački plana broj 18, dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII	148
Slika 8.19. 3D dijagram radijalne brzine deformacije $\dot{\varepsilon}_r [s^{-1}]$ u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom	151
Slika 8.20. 3D dijagram aksijalne brzine deformacije $\dot{\varepsilon}_z [s^{-1}]$ u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom	151
Slika 8.21. 3D dijagram obodne brzine deformacije $\dot{\varepsilon}_\theta [s^{-1}]$ u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom	151
Slika 8.22. 3D dijagram smičuće brzine deformacije $\dot{\gamma}_{rz} [s^{-1}]$ u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom	151
Slika 8.23. 3D dijagram efektivne brzine deformacije $\dot{\varepsilon}_e [s^{-1}]$ u centralnoj tački plana dobijen DEFORM simulacijom	151
Slika 8.24. 3D dijagram radijalne brzine deformacije u tački eksperimentalnog plana broj 7, dobijen DEFORM simulacijom	152
Slika 8.25. 3D dijagram aksijalne brzine deformacije u tački eksperimentalnog plana broj 7, dobijen DEFORM simulacijom	152
Slika 8.26. 3D dijagram obodne brzine deformacije u tački eksperimentalnog plana broj 7, dobijen DEFORM simulacijom	153
Slika 8.27. 3D dijagram smičuće brzine deformacije u tački eksperimentalnog plana broj 7, dobijen DEFORM simulacijom	153
Slika 8.28. 3D dijagram efektivne brzine deformacije u tački eksperimentalnog plana broj 7, dobijen DEFORM simulacijom	154
Slika 8.29. Radijalna brzina deformacije $\dot{\varepsilon}_r [s^{-1}]$ u centralnoj tački plana dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII	155
Slika 8.30. Aksijalna brzina deformacije $\dot{\varepsilon}_z [s^{-1}]$ u centralnoj tački plana dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I;	

b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII.....	156
Slika 8.31. Obodna brzina deformacije $\dot{\epsilon}_{\theta}$ [s ⁻¹] u centralnoj tački plana dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII.....	157
Slika 8.32. Smičuća brzina deformacije $\dot{\gamma}_{rz}$ [s ⁻¹] u centralnoj tački plana dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII.....	158
Slika 8.33. Efektivna brzina deformacije $\dot{\epsilon}_e$ [s ⁻¹] u centralnoj tački plana dobijena MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII.....	159
Slika 8.34. Radijalni napon σ_r u tački eksperimentalnog plana broj 16, dobijen MFD.....	161
Slika 8.35. Aksijalni napon σ_z u tački eksperimentalnog plana broj 16, dobijen MFD.....	161
Slika 8.36. Obodni napon σ_{θ} u tački eksperimentalnog plana broj 16, dobijen MFD.....	161
Slika 8.37. 3D dijagram radijalnog napona σ_r u centralnoj tački eksperimentalnog plana dobijen DEFORM simulacijom.....	162
Slika 8.38. 3D dijagram aksijalnog napona σ_z u centralnoj tački eksperimentalnog plana dobijen DEFORM simulacijom.....	162
Slika 8.39. 3D dijagram obodnog napona σ_{θ} u centralnoj tački eksperimentalnog plana dobijen DEFORM simulacijom.....	163
Slika 8.40. 3D dijagram smičućeg napona γ_{rz} u centralnoj tački eksperimentalnog plana dobijen DEFORM simulacijom.....	163
Slika 8.41. 3D dijagram efektivnog napona σ_e u centralnoj tački eksperimentalnog plana dobijen DEFORM simulacijom.....	163
Slika 8.42. 3D dijagram radijalnog napona σ_r u tački broj 7 dobijen DEFORM simulacijom.....	166
Slika 8.43. 3D dijagram aksijalnog napona σ_z u tački broj 7 dobijen DEFORM simulacijom.....	166
Slika 8.44. 3D dijagram obodnog napona σ_{θ} u tački broj 7 dobijen DEFORM simulacijom.....	166
Slika 8.45. 3D dijagram smičućeg napona γ_{rz} u tački broj 7 dobijen DEFORM simulacijom.....	166
Slika 8.46. 3D dijagram efektivnog napona σ_e u tački br. 7 dobijen DEFORM simulacijom.....	166
Slika 8.47. Radijalni napon σ_r [daN/mm ²] u centralnoj tački plana dobijen MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII.....	167
Slika 8.48. Aksijalni napon σ_z [daN/mm ²] u centralnoj tački plana dobijen MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII.....	168
Slika 8.49. Obodni napon σ_{θ} [daN/mm ²] u centralnoj tački plana dobijen MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII.....	169
Slika 8.50. Smičući napon τ_{rz} [daN/mm ²] u centralnoj tački plana dobijen MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II;	

	c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII	170
Slika 8.51.	Efektivni napon σ_e [daN/mm ²] u centralnoj tački plana dobijen MFD, DEFORM simulacijom i modeliranjem: a) Presjek I-I; b) Presjek II-II; c) Presjek III-III; d) Presjek IV-IV; e) Presjek V-V; f) Presjek VI-VI; g) Presjek VII-VII	171
Slika 8.52.	Deformacione sile u funkciji hoda dobijene eksperimentom i DEFORM simulacijom i maksimalna deformaciona sila dobijena MFD za centralnu tačku plana	172

Spisak tabela

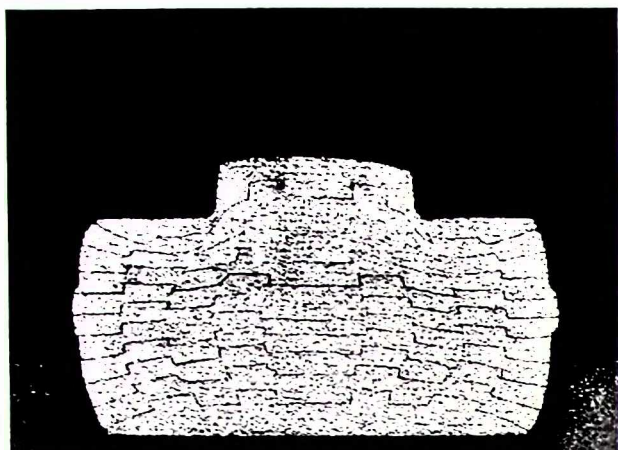
Tabela 3.1.	Programski paketi za numeričku simulaciju procesa deformisanja.....	34
Tabela 4.1.	Plan matrica višefaktornog ortogonalnog plana	41
Tabela 4.2.	Nivoi varijacije ulaznih faktora plana eksperimenta	41
Tabela 4.3.	Karakteristične dimenzije seta ploča segmentnih kalupa	47
Tabela 4.4.	Hemijski sastav materijala korištenih u eksperimentalnim istraživanjima.....	48
Tabela 4.5.	Dimenzije i brojevi kompaktnih priprema	49
Tabela 4.6.	Dimenzije i brojevi segmentnih priprema.....	52
Tabela 4.7.	Potreban broj žljebastih pločica za plan eksperimenta	52
Tabela 5.1.	Dimenzije i količina priprema za ispitivanje koeficijenta faktora trenja	57
Tabela 5.2.	Izmjerene visine prstenova po fazama sabijanja.....	58
Tabela 5.3.	Izmjereni unutrašnji prečnici prstenova po fazama sabijanja	58
Tabela 5.4.	Stepeni redukcija visina prstenova po fazama sabijanja.....	58
Tabela 5.5.	Stepeni promjene unutrašnjih prečnika prstenova po fazama sabijanja	58
Tabela 5.6.	Male-Cockcroft kalibracioni dijagrami za koeficijent trenja μ	59
Tabela 5.7.	Lee-Altan kalibracioni dijagrami za faktor trenja m	60
Tabela 5.8.	Liu kalibracioni dijagrami za faktor trenja m	61
Tabela 5.9.	Wanheim-Danckert kalibracioni dijagrami za m -trenje kod idealno plastičnog materijala	62
Tabela 5.10.	Wanheim-Danckert kalibracioni dijagrami za $f(\mu)$ -trenje kod materijala koji deformaciono ojačava	63
Tabela 5.11.	Primjer ulaznih podataka za DEFORM simulaciju sabijanja prstena od olova na $t=20$ [°C] i faktor trenja $m=0.50$	64
Tabela 5.12.	DEFORM simulacija sabijanja prstena od Pb na $t=20$ [°C] za $m=0.00$ i $m=0.05$	65
Tabela 5.13.	DEFORM simulacija sabijanja prstena od Pb na $t=20$ [°C] za $m=0.10$ i $m=0.15$	66
Tabela 5.14.	DEFORM simulacija sabijanja prstena od Pb na $t=20$ [°C] za $m=0.20$ i $m=0.25$	67
Tabela 5.15.	DEFORM simulacija sabijanja prstena od Pb na $t=20$ [°C] za $m=0.30$ i $m=0.40$	68
Tabela 5.16.	DEFORM simulacija sabijanja prstena od Pb na $t=20$ [°C] za $m=0.50$ i $m=0.60$	69
Tabela 5.17.	DEFORM simulacija sabijanja prstena od Pb na $t=20$ [°C] za $m=0.80$ i $m=1.00$	70
Tabela 5.18.	DEFORM kalibracioni dijagram za m -trenje	71
Tabela 5.19.	Procijenjeni intervali koeficijenta/faktora trenja	72
Tabela 5.20.	Koeficijenti/faktori trenja	73
Tabela 5.21.	Ocjena koeficijenata/faktora trenja.....	75
Tabela 6.1.	Dimenzije i potreban broj priprema za MIZOD (Slika 3.10.)	77
Tabela 6.2.	Promjena geometrije po fazama deformisanja kod MIZOD za $AlMgSi_{0,5}$ na $t=20$ [°C]	77
Tabela 6.3.	Karakteristične dimenzije priprema za MSHT (Slika 3.10.).....	79
Tabela 6.4.	Dimenzije i brojevi komada priprema za ŠM	80
Tabela 6.5.	Parametri ekstrapolacionih funkcija (5.27) kod ŠM za $AlMgSi_{0,5}$ na $t=20$ [°C]	81

Tabela 6.6.	Promjena geometrije obradka kod UM za AlMgSi0,5 na $t=20$ [°C]	81
Tabela 6.7.	Parametri aproksimativnih funkcija (6.2) do (6.5)	82
Tabela 6.8.	Parametri funkcija aproksimacije krivih ojačavanja	86
Tabela 6.9.	Parametri funkcija ekvivalentnih krivih ojačavanja	87
Tabela 6.10.	Parametri funkcija aproksimacije "površni" ojačavanja	88
Tabela 6.11.	Primjer ulaznih podataka kod DEFORM simulacije olova sa podmazivanjem	90
Tabela 7.1.	Radijusi r_{bz} [mm] tačaka deformisanih aksijalnih linija	97
Tabela 7.2.	Visine z_{bz} [mm] tačaka deformisanih aksijalnih linija	97
Tabela 7.3.	Radijusi r_{br} [mm] tačaka deformisanih radijalnih linija	98
Tabela 7.4.	Visine z_{br} [mm] tačaka deformisanih radijalnih linija	98
Tabela 7.5.	Radijusi r_{pb} [mm] presječnih tačaka deformisane mreže	100
Tabela 7.6.	Visine z_{pb} [mm] presječnih tačaka deformisane mreže	100
Tabela 7.7.	Geometrijski parametri žljebastih ploča	101
Tabela 7.8.	Radijusi r_{p0} [mm] presječnih tačaka nedeformisane mreže	102
Tabela 7.9.	Visine z_{p0} [mm] presječnih tačaka nedeformisane mreže	102
Tabela 7.10.	Parcijalni izvod radijalnog pomjeranja po radijusu $\partial u_r / \partial r$	103
Tabela 7.11.	Parcijalni izvod radijalnog pomjeranja po visini $\partial u_r / \partial z$	104
Tabela 7.12.	Parcijalni izvod aksijalnog pomjeranja po visini $\partial u_z / \partial z$	104
Tabela 7.13.	Parcijalni izvod aksijalnog pomjeranja po radijusu $\partial u_z / \partial r$	105
Tabela 7.14.	Radijusi tačaka presjeka r [mm]	105
Tabela 7.15.	Visine posmatranih tačaka presjeka z [mm]	106
Tabela 7.16.	Radijalna logaritamska deformacija ϕ_r	107
Tabela 7.17.	Aksijalna logaritamska deformacija ϕ_z	108
Tabela 7.18.	Obodna logaritamska deformacija ϕ_θ	108
Tabela 7.19.	Smičuća deformacija γ_{rz}	109
Tabela 7.20.	Efektivna deformacija ϕ_e	109
Tabela 7.21.	Radijusi tačaka aksijalnih linija na početku posmatranog intervala r_{az} [mm]	112
Tabela 7.22.	Visine tačaka aksijalnih linija na početku posmatranog intervala z_{az} [mm]	112
Tabela 7.23.	Radijusi tačaka radijalnih linija na početku posmatranog intervala r_{ar} [mm]	113
Tabela 7.24.	Visine tačaka radijalnih linija na početku posmatranog intervala z_{ar} [mm]	114
Tabela 7.25.	Radijusi presječnih tačaka na početku posmatranog intervala r_{pa} [mm]	115
Tabela 7.26.	Visine presječnih tačaka na početku posmatranog intervala z_{pa} [mm]	115
Tabela 7.27.	Parcijalni izvod brzine radijalnog pomjeranja po radijusu $\partial v_r / \partial r$	117
Tabela 7.28.	Parcijalni izvod brzine radijalnog pomjeranja po visini $\partial v_r / \partial z$	117
Tabela 7.29.	Parcijalni izvod brzine aksijalnog pomjeranja po radijusu $\partial v_z / \partial r$	118
Tabela 7.30.	Parcijalni izvod brzine aksijalnog pomjeranja po visini $\partial v_z / \partial z$	118
Tabela 7.31.	Radijalna brzina logaritamske deformacije: $\dot{\epsilon}_r$ [s^{-1}]	119
Tabela 7.32.	Aksijalna brzina logaritamske deformacije: $\dot{\epsilon}_z$ [s^{-1}]	119
Tabela 7.33.	Obodna brzina logaritamske deformacije: $\dot{\epsilon}_\theta$ [s^{-1}]	120
Tabela 7.34.	Smičuća brzina deformacije: $\dot{\gamma}_{rz}$ [s^{-1}]	121
Tabela 7.35.	Efektivna brzina deformacije: $\dot{\epsilon}_e$ [s^{-1}]	121
Tabela 7.36.	Podintegralna funkcija jednačine visioplastičnosti u [daN/mm^3]	124
Tabela 7.37.	Neodređeni integral jednačine visioplastičnosti: $\Delta\sigma_z + C$ [daN/mm^2]	125
Tabela 7.38.	Aksijalni napon: σ_z [daN/mm^2]	126
Tabela 7.39.	Radijalni napon: σ_r [daN/mm^2]	127
Tabela 7.40.	Obodni napon: σ_θ [daN/mm^2]	127
Tabela 7.41.	Smičući napon τ_{rz} [daN/mm^2]	128
Tabela 7.42.	Efektivni napon napon σ_e [daN/mm^2]	128

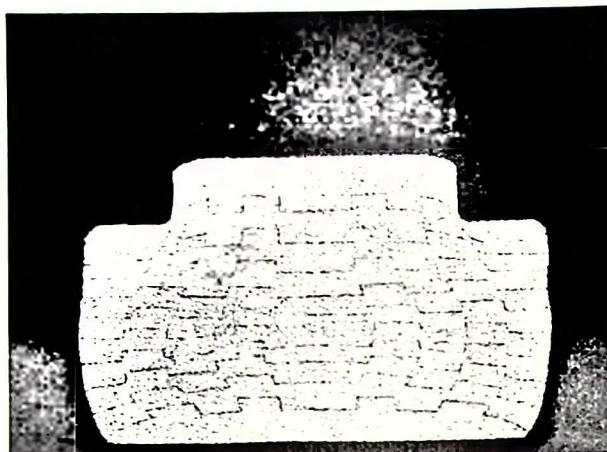
Tabela 7.43. Ulazni podaci za DEFORM simulaciju u centralnoj tački plana.....	130
Tabela 8.1. Maksimalne deformacione sile dobijene MFD, eksperimentalno i DEFORM simulacijom	173

PRILOZI

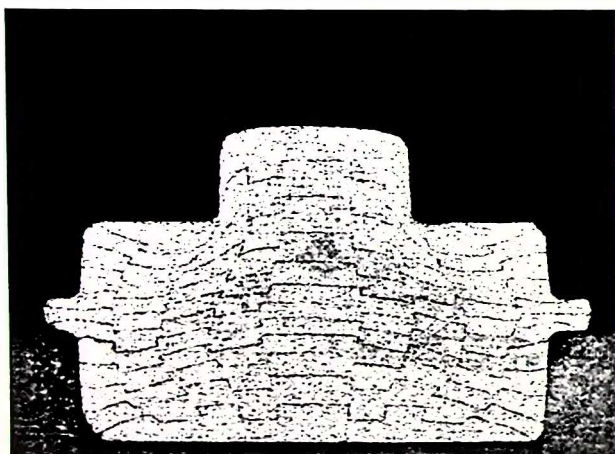
Prilog P.1. Skenirani meridijalni presjeci obradaka	204
Slika P.1.1. do Slike P.1.20	
Digitalizovane slike presjeka u tačkama plana eksperimenta na početku intervala	204
Slika P.1.21. do Slike P.1.40	
Digitalizovane slike presjeka u tačkama plana eksperimenta na kraju procesa deformisanja	208
Prilog P.2. Deformacione sile	212
Slika P.2.1. do Slike P.2.36.	
Deformacione sile u tačkama plana eksperimenta	212
Prilog P.3. Karakteristični računarski programi.....	218
Program P.3.1. Određivanje komponentata logaritamskih deformacija	218
Program P.3.2. Određivanje komponentata brzina deformacija	223
Program P.3.3. Određivanje komponentata napona	228
Prilog P.4. Mreže konačnih elemenata na kraju procesa deformisanja u tačkama plana eksperimenta	230
Slika P.4.1. do Slike P.4.16.	
Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 1 plana eksperimenta.....	230
Prilog P.5. Parametri modela efektivne deformacije u karakterističnim tačkama presjeka	233
Tabela P.5.1. do Tabele P.5.15.	
Parametri $\beta_1, \dots, \beta_{15}$ modela (7.14) efektivne logaritamske deformacije φ_e	233
Prilog P.6. Karakteristične fotografije	248
Slika P.6.1. Postavljanje priprema u alat	248
Slika P.6.2. Kompletiranje sklopa alata	248
Slika P.6.3. Proces deformisanja na presi	248
Slika P.6.4. Deformisani obradci	248
Slika P.6.5. Alati za stezanje žljebastih pločica pri izradi na strugu.....	248
Slika P.6.6. Izrada žljebastih pločica na strugu.....	248
Slika P.6.7. Alati za stezanje segmentnih priprema pri obradi na konačnu mjeru	249
Slika P.6.8. Alati za spajanje žljebastih pločica u segmentne pripreme	249
Slika P.6.9. Univerzalni strug US 400	249
Slika P.6.10. Univerzalna glodalica FGU 32	249
Slika P.6.11. Laboratorijska peć LP 08.....	249
Slika P.6.12. Tračna testera UD 210	249



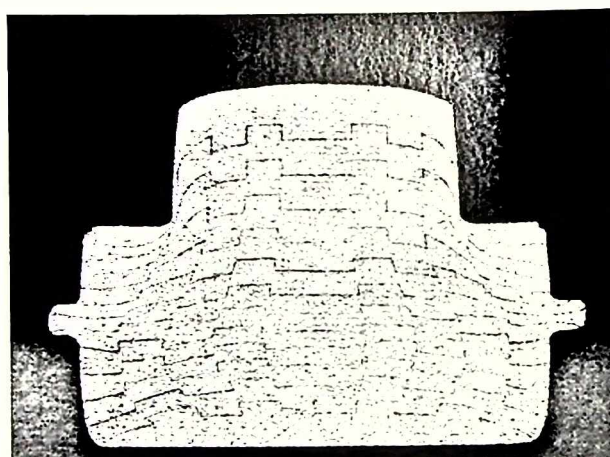
Slika P.1.1. Digitalizovana slika presjeka u 1. tački plana na početku intervala



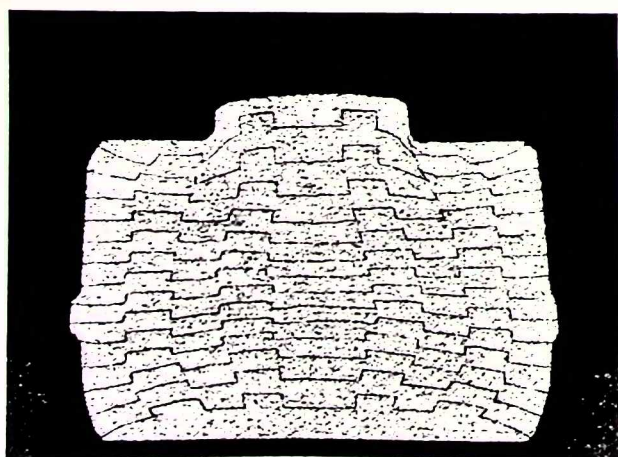
Slika P.1.2. Digitalizovana slika presjeka u 2. tački plana na početku intervala



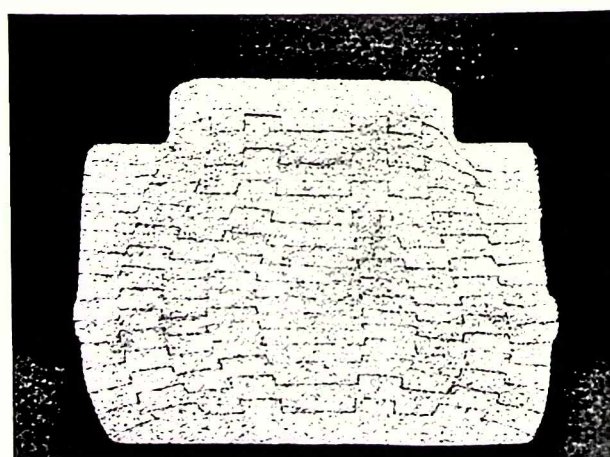
Slika P.1.3. Digitalizovana slika presjeka u 3. tački plana na početku intervala



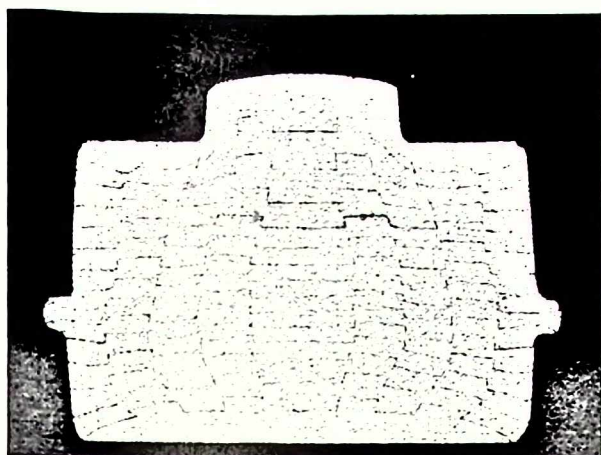
Slika P.1.4. Digitalizovana slika presjeka u 4. tački plana na početku intervala



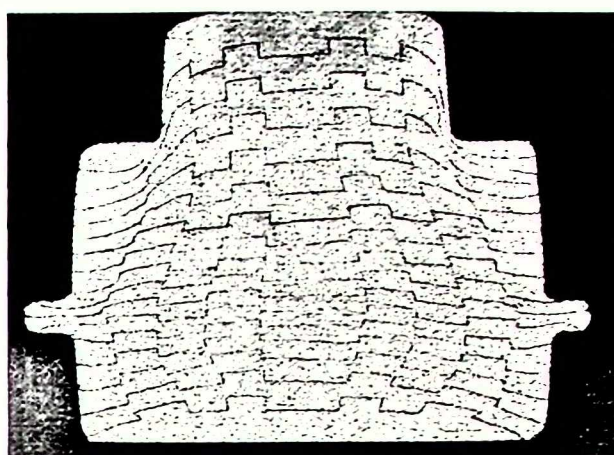
Slika P.1.5. Digitalizovana slika presjeka u 5. tački plana na početku intervala



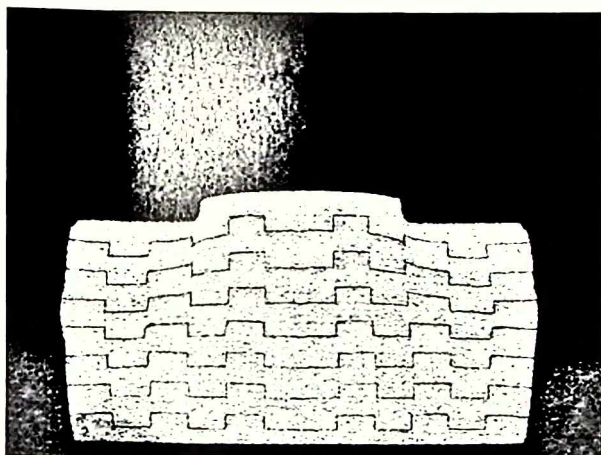
Slika P.1.6. Digitalizovana slika presjeka u 6. tački plana na početku intervala



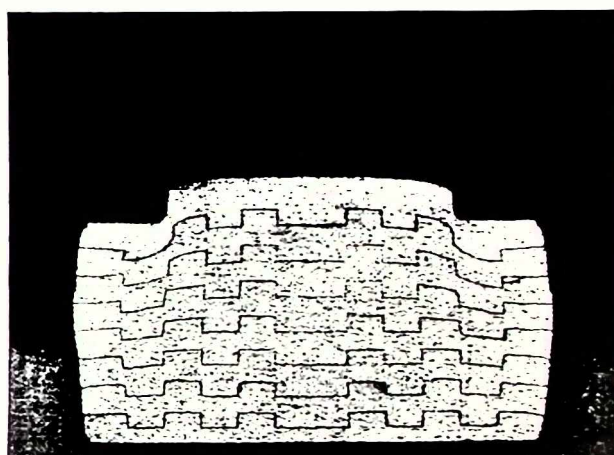
Slika P.1.7. Digitalizovana slika presjeka u 7. tački plana na početku intervala



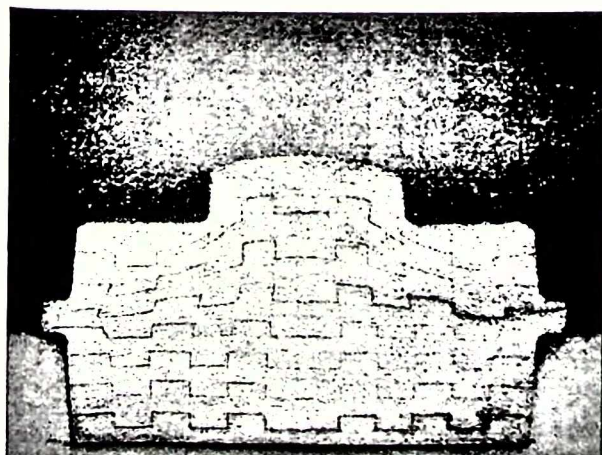
Slika P.1.8. Digitalizovana slika presjeka u 8. tački plana na početku intervala



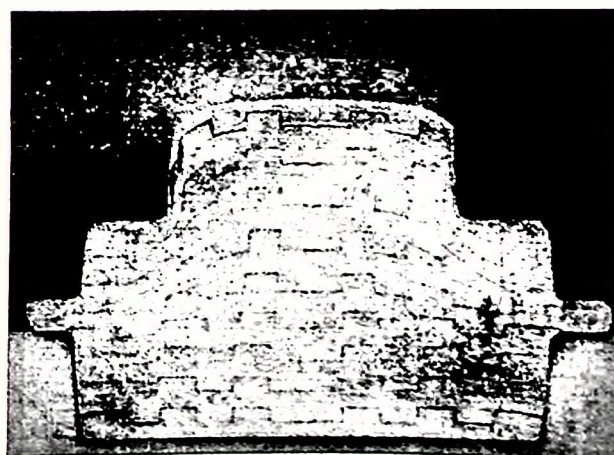
Slika P.1.9. Digitalizovana slika presjeka u 9. tački plana na početku intervala



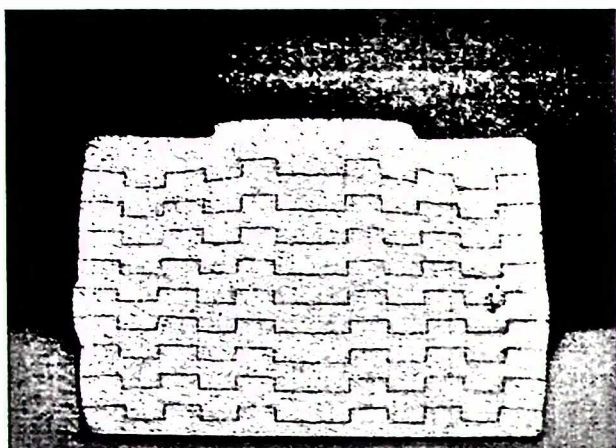
Slika P.1.10. Digitalizovana slika presjeka u 10. tački plana na početku intervala



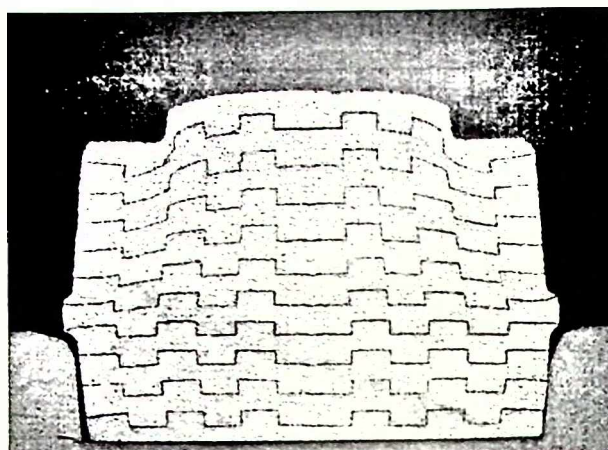
Slika P.1.11. Digitalizovana slika presjeka u 11. tački plana na početku intervala



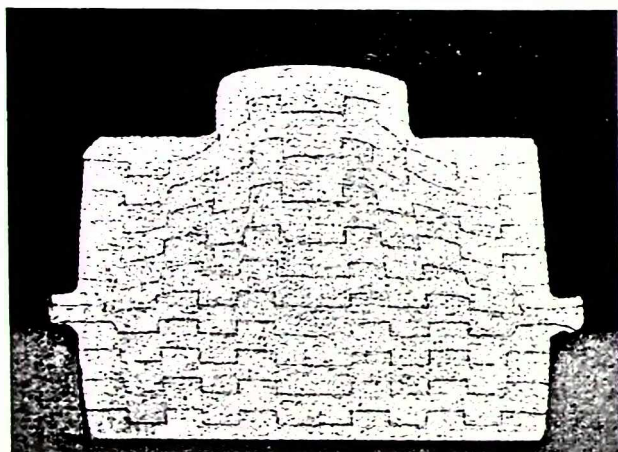
Slika P.1.12. Digitalizovana slika presjeka u 12. tački plana na početku intervala



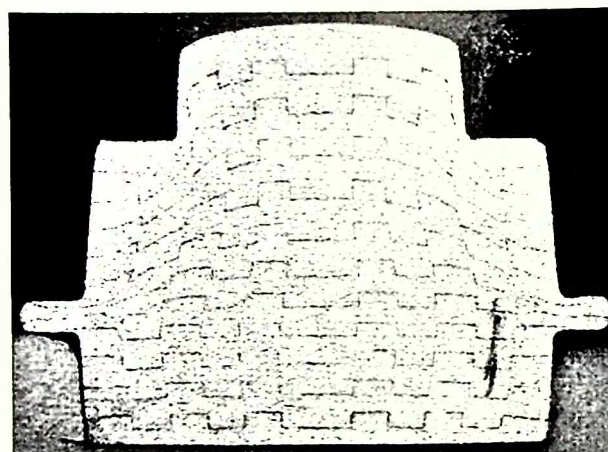
Slika P.1.13. Digitalizovana slika presjeka u 13. tački plana na početku intervala



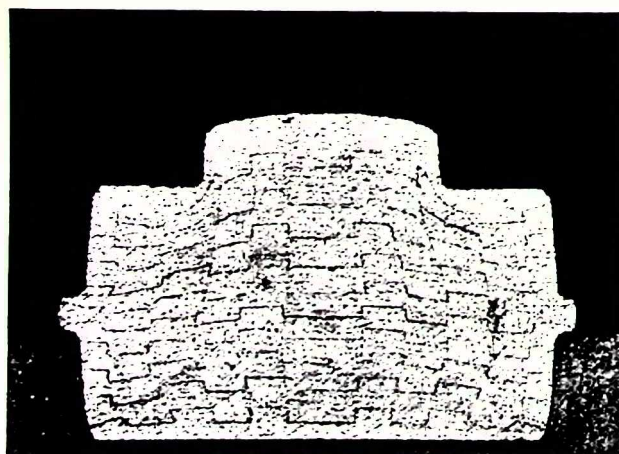
Slika P.1.14. Digitalizovana slika presjeka u 14. tački plana na početku intervala



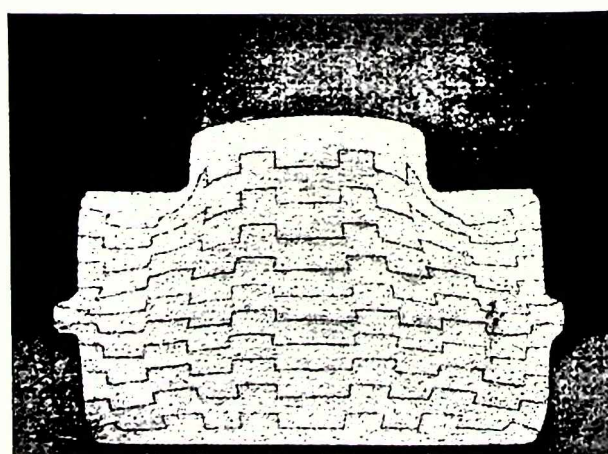
Slika P.1.15. Digitalizovana slika presjeka u 15. tački plana na početku intervala



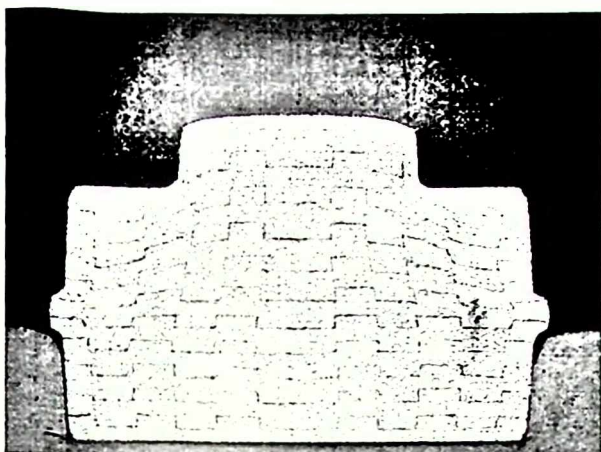
Slika P.1.16. Digitalizovana slika presjeka u 16. tački plana na početku intervala



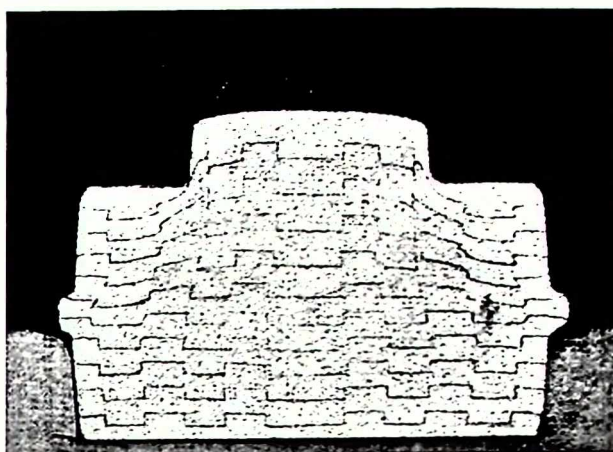
Slika P.1.17. Digitalizovana slika presjeka u 17. tački plana na početku intervala



Slika P.1.18. Digitalizovana slika presjeka u 18. tački plana na početku intervala

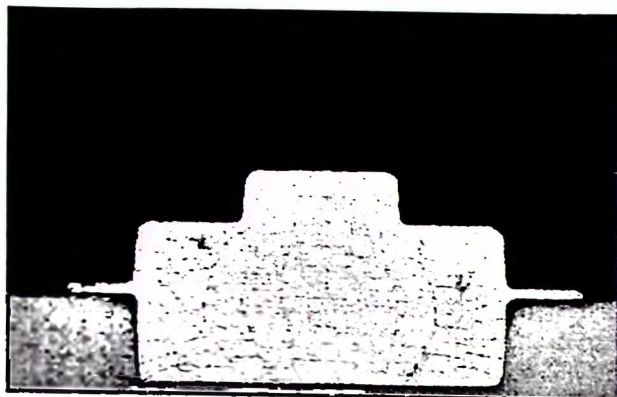


*Slika P.1.19. Digitalizovana slika presjeka u
19. tački plana na početku intervala*

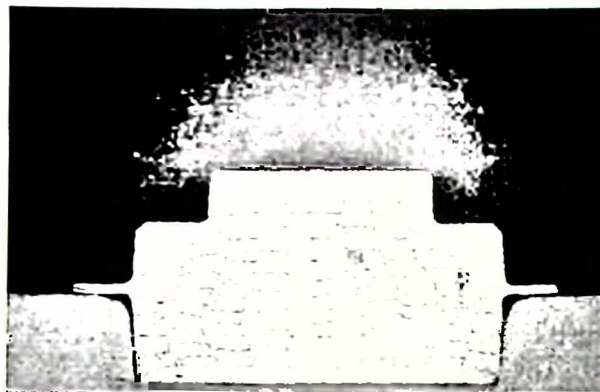


*Slika P.1.20. Digitalizovana slika presjeka u
20. tački plana na početku intervala*

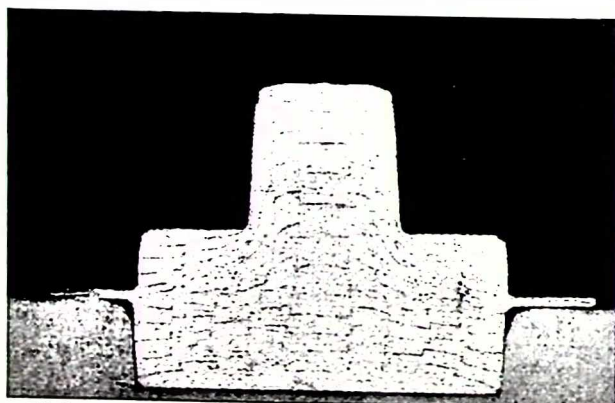




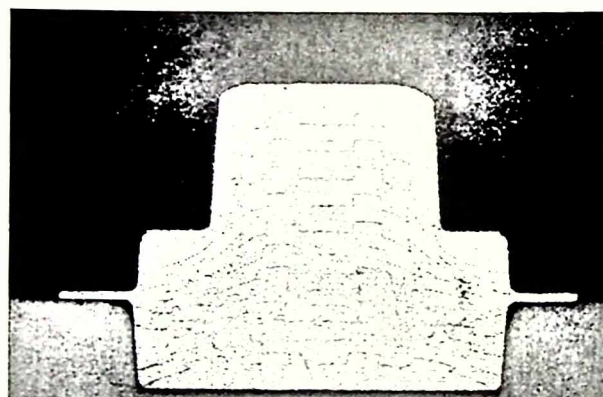
Slika P.1.21. Digitalizovana slika presjeka u 1. tački plana na kraju procesa



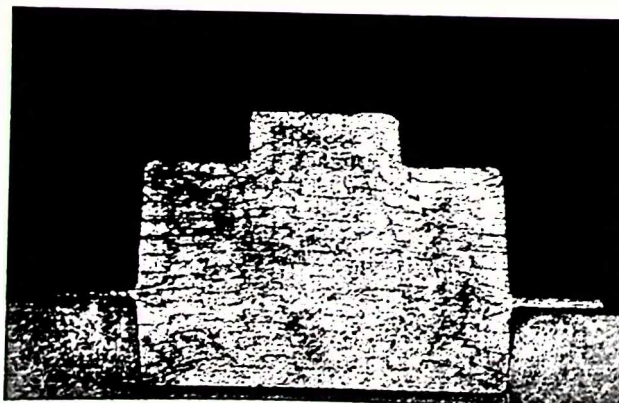
Slika P.1.22. Digitalizovana slika presjeka u 2. tački plana na kraju procesa



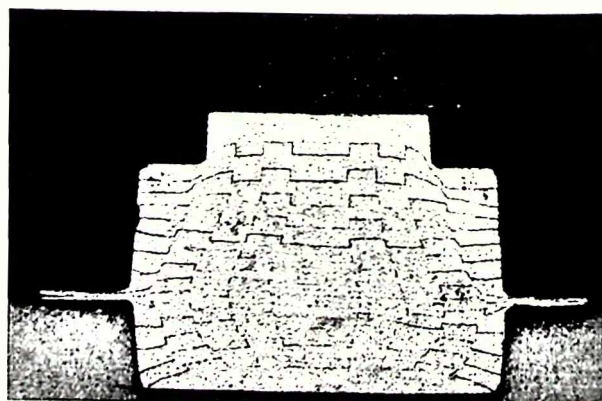
Slika P.1.23. Digitalizovana slika presjeka u 3. tački plana na kraju procesa



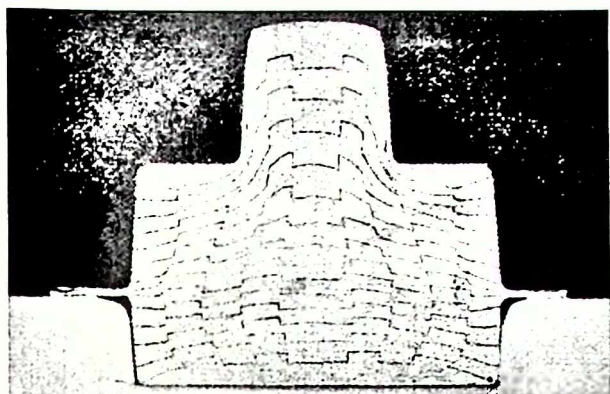
Slika P.1.24. Digitalizovana slika presjeka u 4. tački plana na kraju procesa



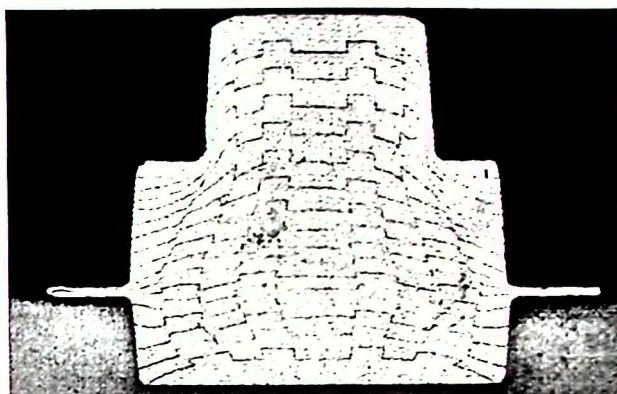
Slika P.1.25. Digitalizovana slika presjeka u 5. tački plana na kraju procesa



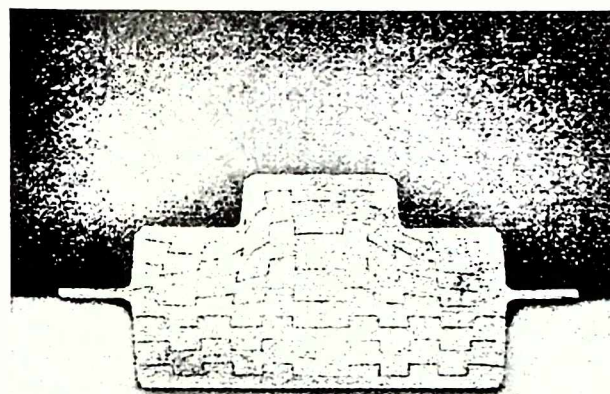
Slika P.1.26. Digitalizovana slika presjeka u 6. tački plana na kraju procesa



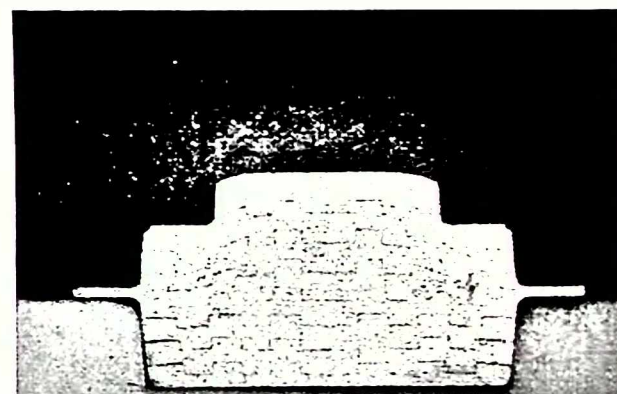
Slika P.1.27. Digitalizovana slika presjeka u 7. tački plana na kraju procesa



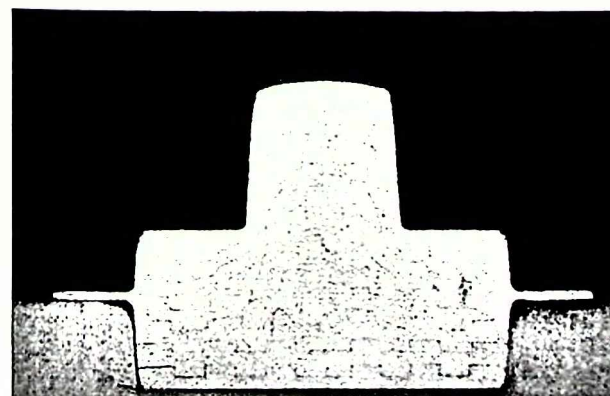
Slika P.1.28. Digitalizovana slika presjeka u 8. tački plana na kraju procesa



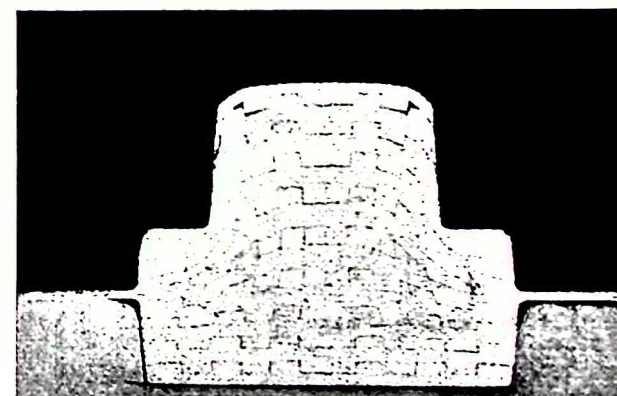
Slika P.1.29. Digitalizovana slika presjeka u 9. tački plana na kraju procesa



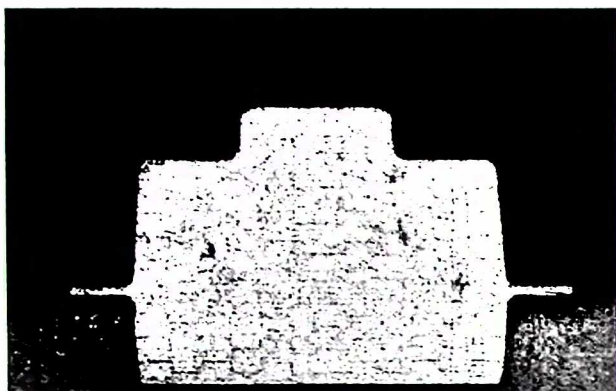
Slika P.1.30. Digitalizovana slika presjeka u 10. tački plana na kraju procesa



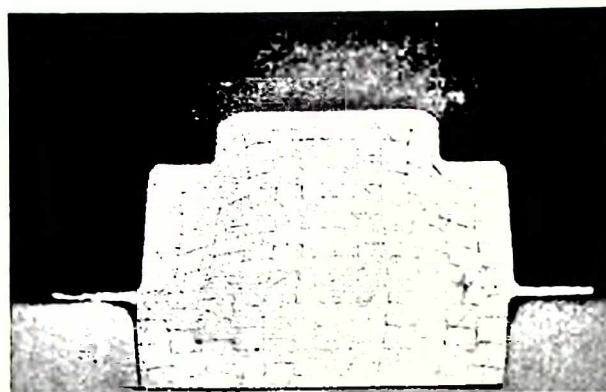
Slika P.1.31. Digitalizovana slika presjeka u 1. tački plana na kraju procesa



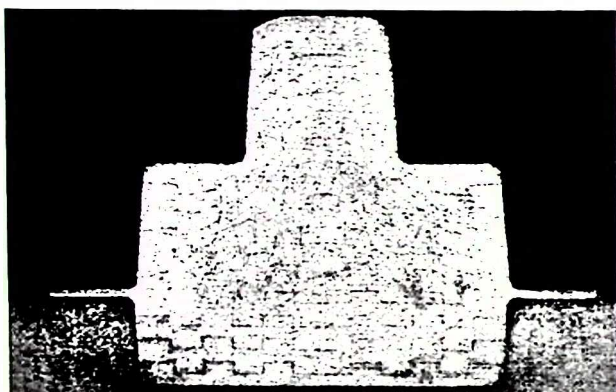
Slika P.1.32. Digitalizovana slika presjeka u 12. tački plana na kraju procesa



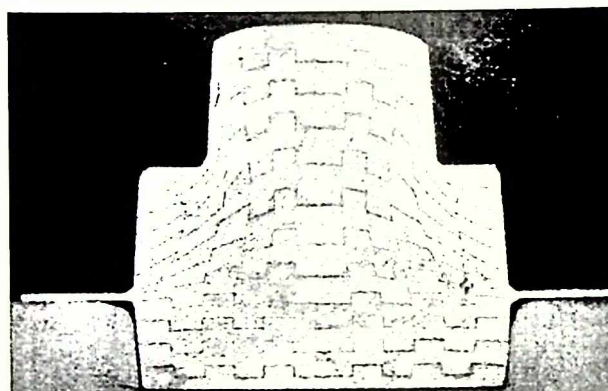
Slika P.1.33. Digitalizovana slika presjeka u 13. tački plana na kraju procesa



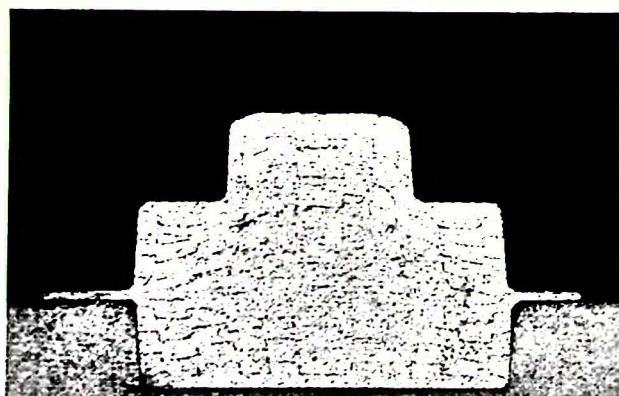
Slika P.1.34. Digitalizovana slika presjeka u 14. tački plana na kraju procesa



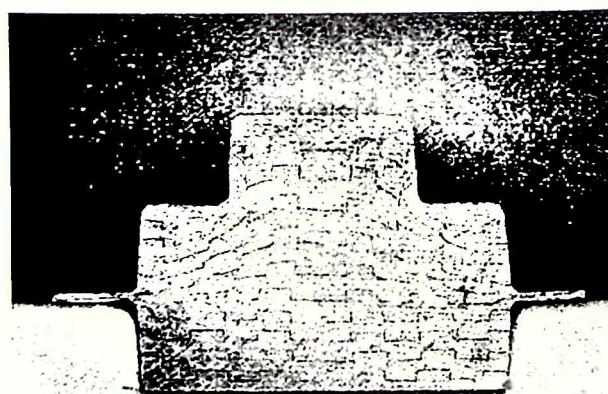
Slika P.1.35. Digitalizovana slika presjeka u 15. tački plana na kraju procesa



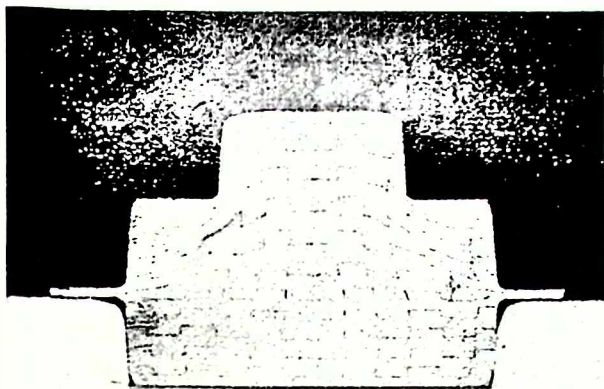
Slika P.1.36. Digitalizovana slika presjeka u 16. tački plana na kraju procesa



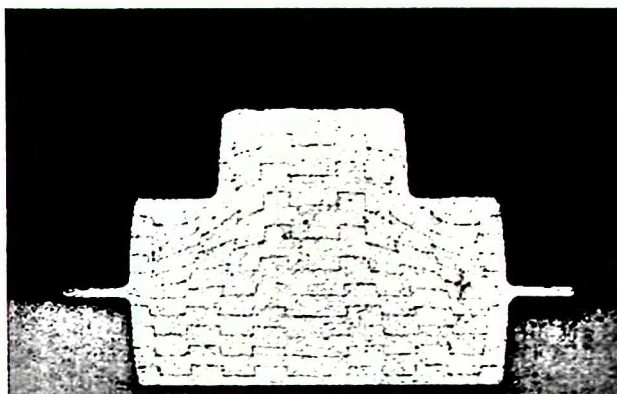
Slika P.1.37. Digitalizovana slika presjeka u 17. tački plana na kraju procesa



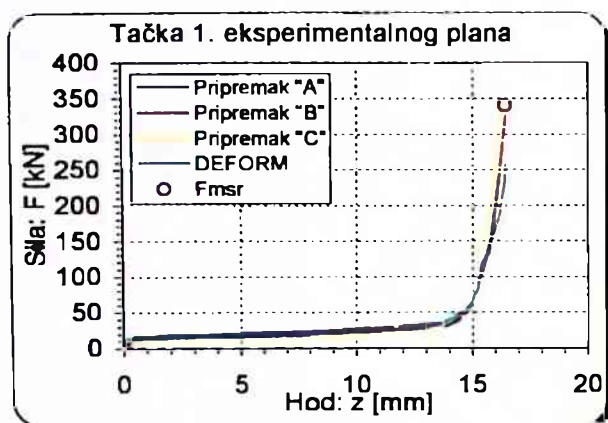
Slika P.1.38. Digitalizovana slika presjeka u 18. tački plana na kraju procesa



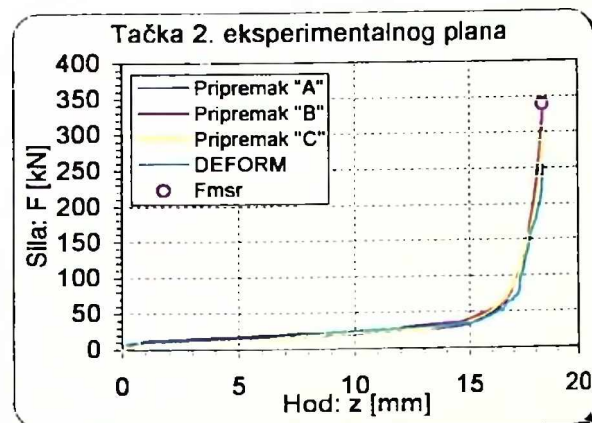
*Slika P.1.39. Digitalizovana slika presjeka u
19. tački plana na kraju procesa*



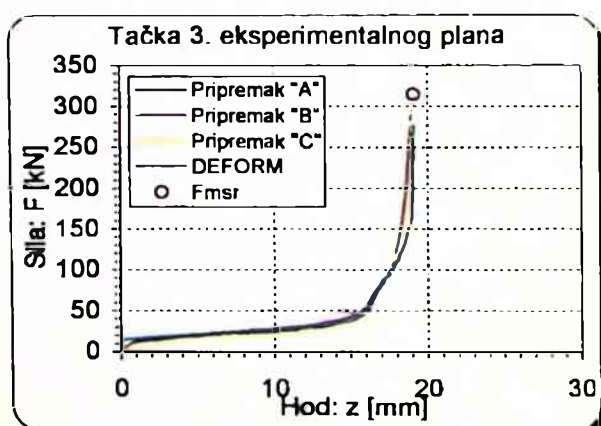
*Slika P.1.40. Digitalizovana slika presjeka u
20. tački plana na kraju procesa*



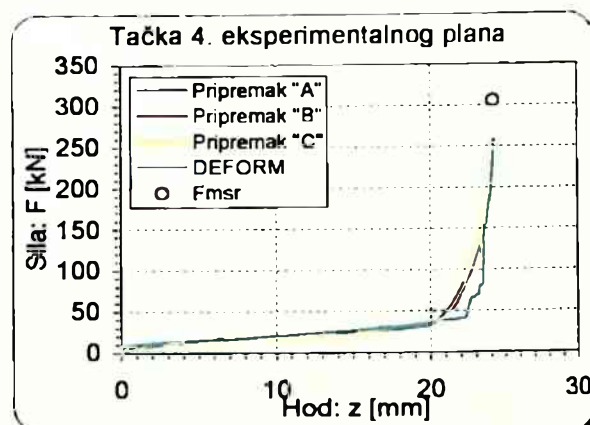
Slika P.2.1. Deformacione sile u 1. tački plana eksperimenta



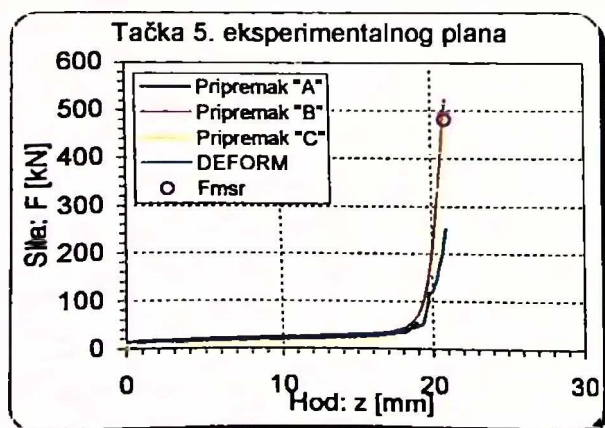
Slika P.2.2. Deformacione sile u 2. tački plana eksperimenta



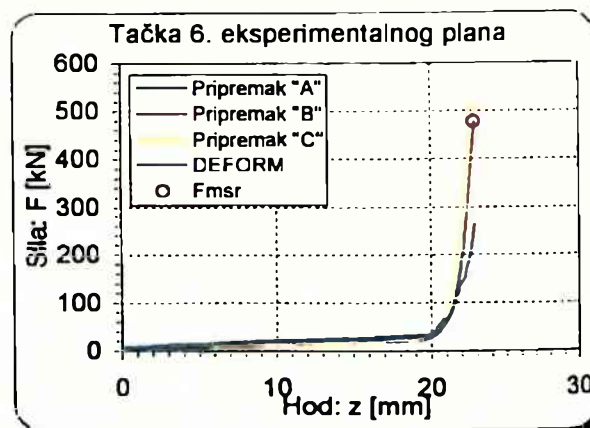
Slika P.2.3. Deformacione sile u 3. tački plana eksperimenta



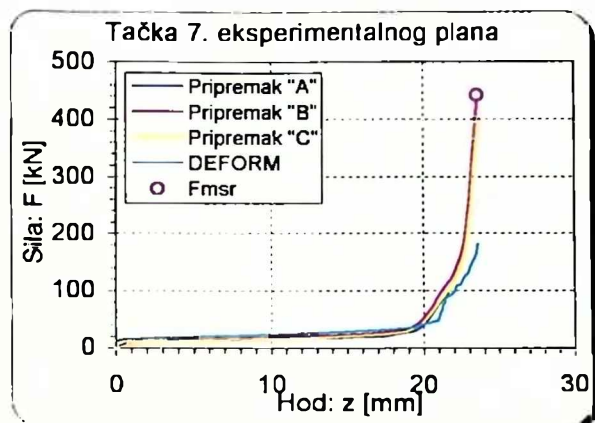
Slika P.2.4. Deformacione sile u 4. tački plana eksperimenta



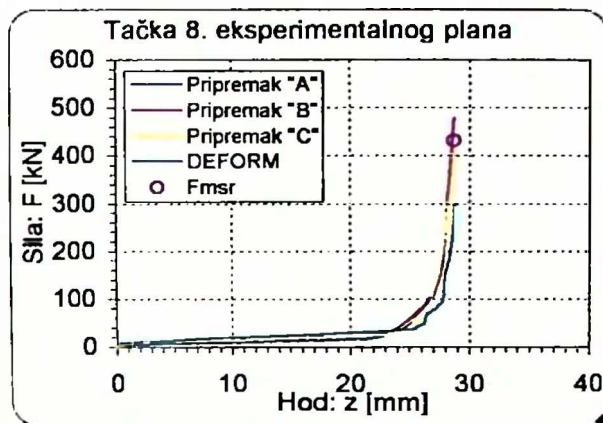
Slika P.2.5. Deformacione sile u 5. tački plana eksperimenta



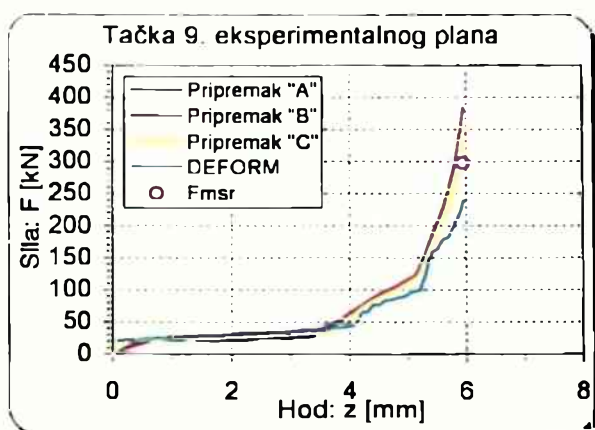
Slika P.2.6. Deformacione sile u 6. tački plana eksperimenta



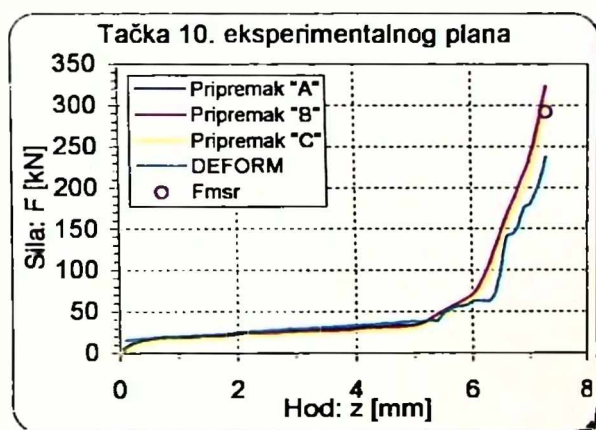
Slika P.2.7. Deformacione sile u 7. tački plana eksperimenta



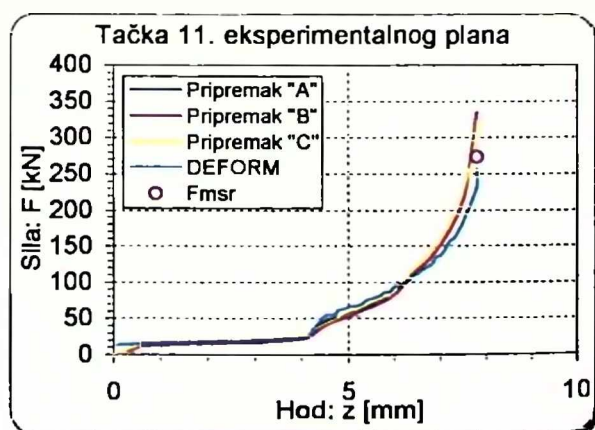
Slika P.2.8. Deformacione sile u 8. tački plana eksperimenta



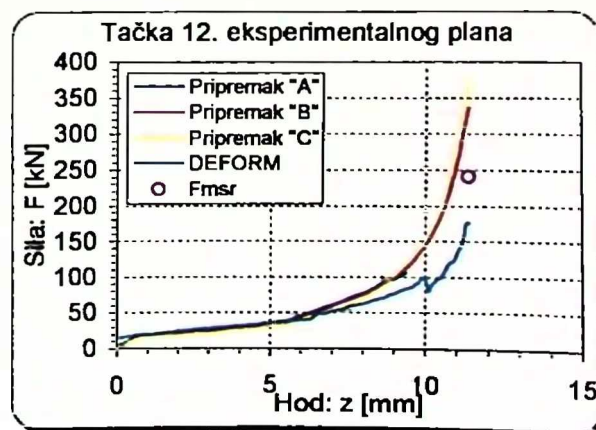
Slika P.2.9. Deformacione sile u 9. tački plana eksperimenta



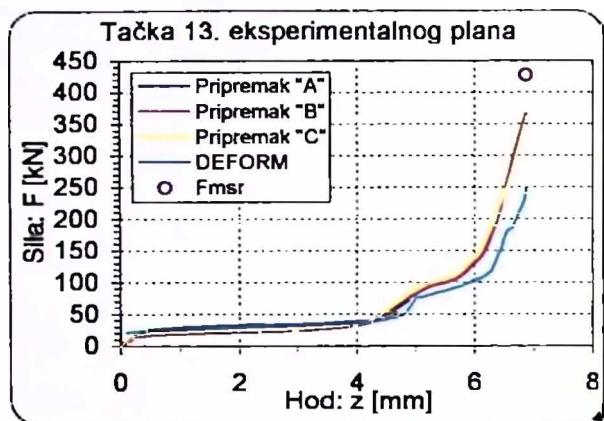
Slika P.2.10. Deformacione sile u 10. tački plana eksperimenta



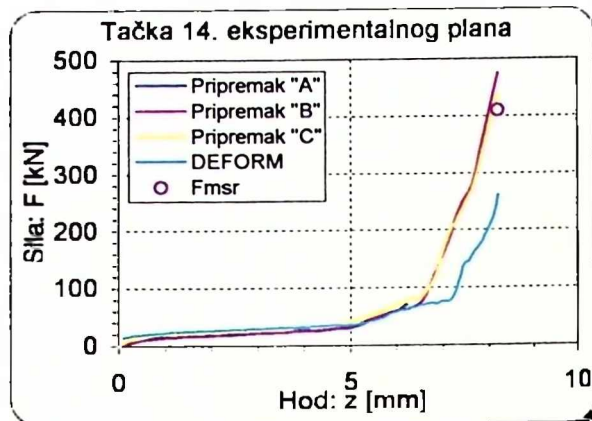
Slika P.2.11. Deformacione sile u 11. tački plana eksperimenta



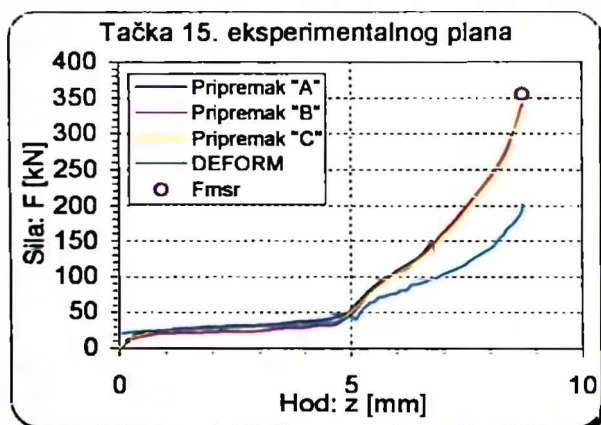
Slika P.2.12. Deformacione sile u 12. tački plana eksperimenta



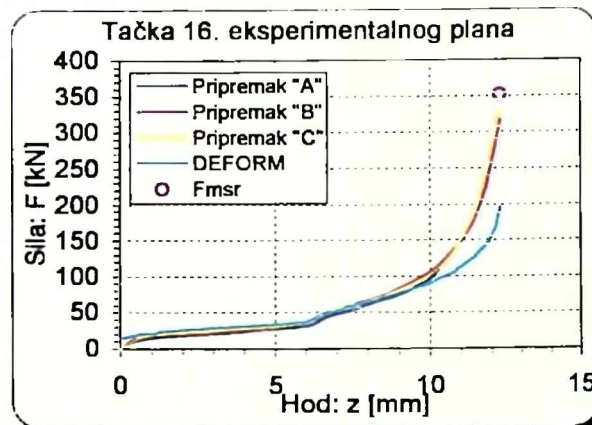
Slika P.2.13. Deformacione sile u 13. tački plana eksperimenta



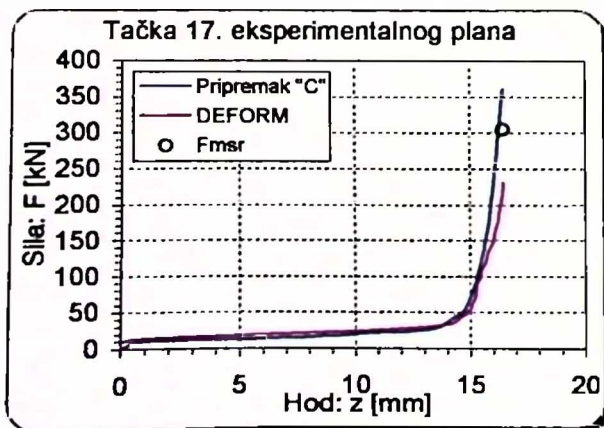
Slika P.2.14. Deformacione sile u 14. tački plana eksperimenta



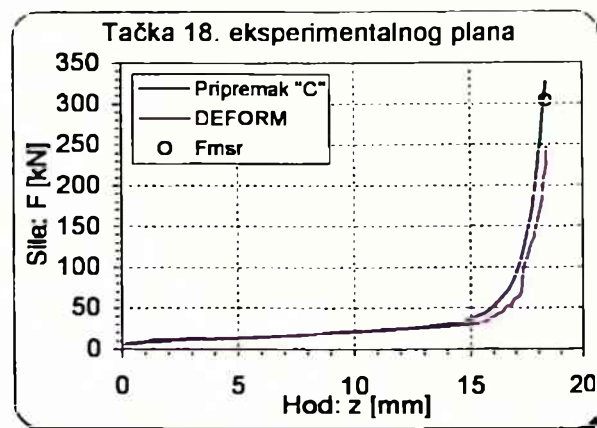
Slika P.2.15. Deformacione sile u 15. tački plana eksperimenta



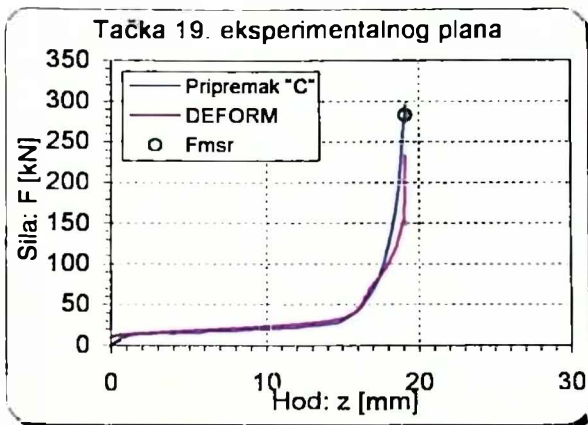
Slika P.2.16. Deformacione sile u 16. tački plana eksperimenta



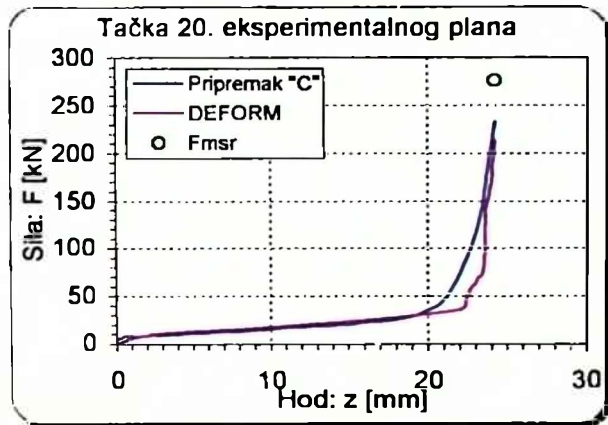
Slika P.2.17. Deformacione sile u 17. tački plana eksperimenta



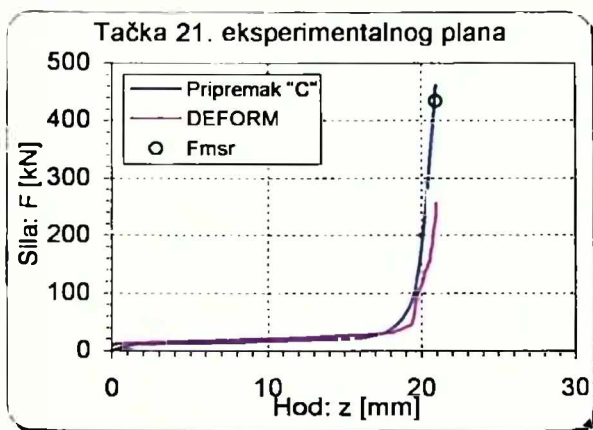
Slika P.2.18. Deformacione sile u 18. tački plana eksperimenta



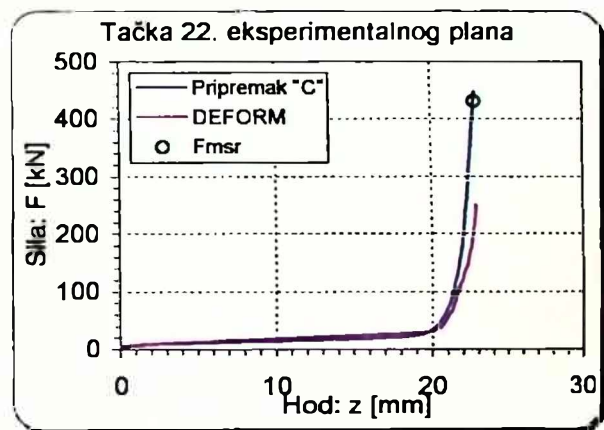
Slika P.2.19. Deformacione sile u 19. tački plana eksperimenta



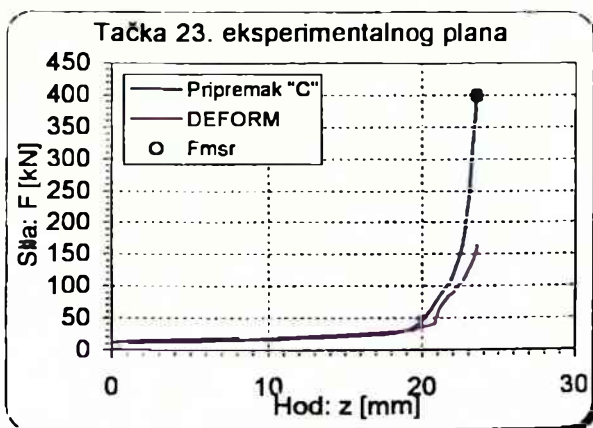
Slika P.2.20. Deformacione sile u 20. tački plana eksperimenta



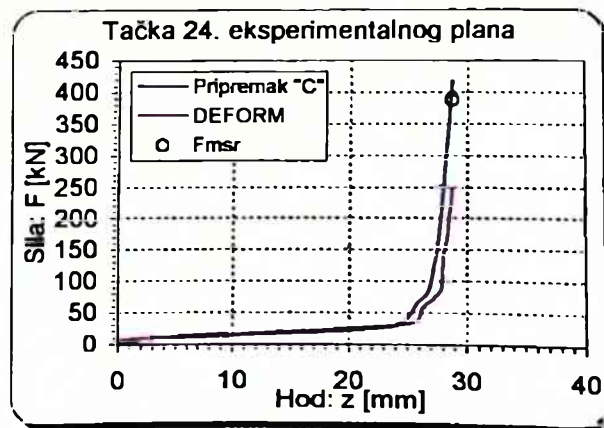
Slika P.2.21. Deformacione sile u 21. tački plana eksperimenta



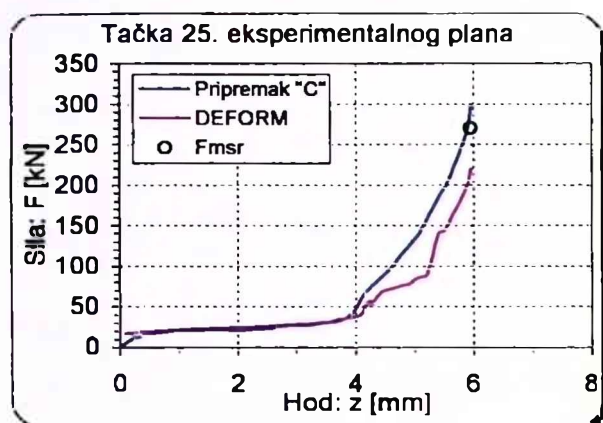
Slika P.2.22. Deformacione sile u 22. tački plana eksperimenta



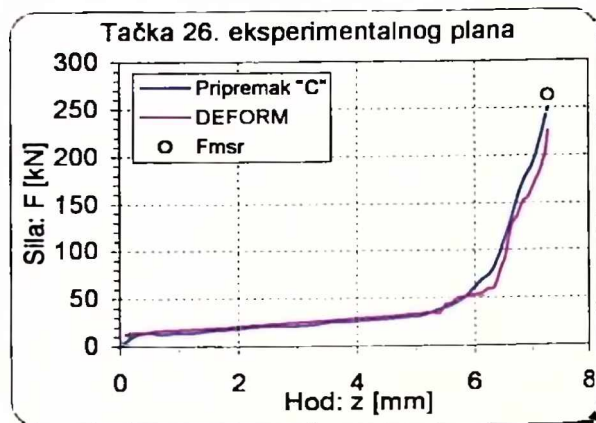
Slika P.2.23. Deformacione sile u 23. tački plana eksperimenta



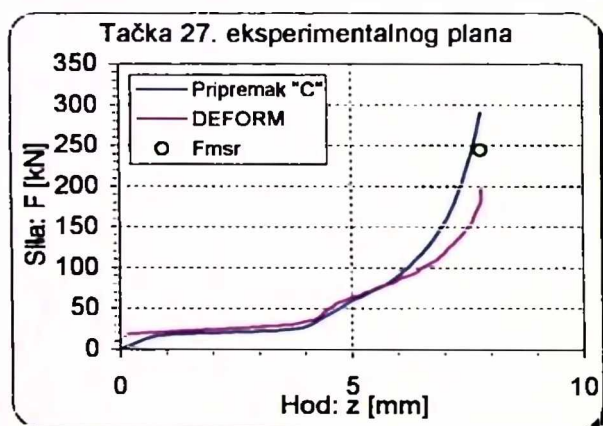
Slika P.2.24. Deformacione sile u 24. tački plana eksperimenta



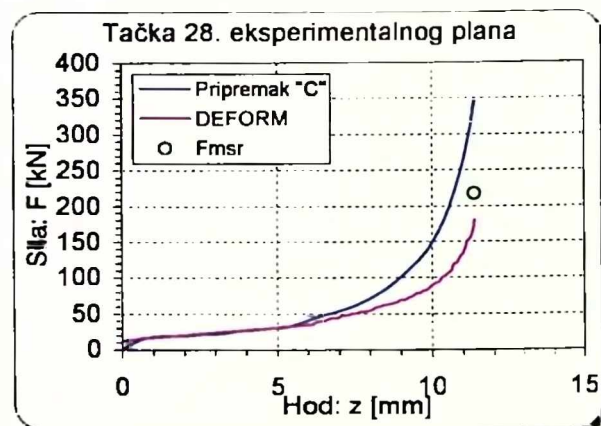
Slika P.2.25. Deformacione sile u 25. tački plana eksperimenta



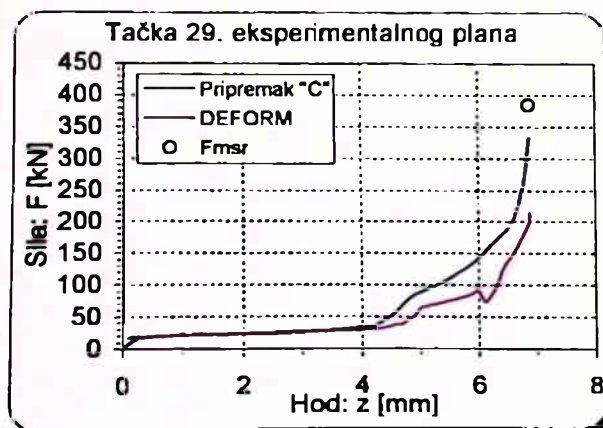
Slika P.2.26. Deformacione sile u 26. tački plana eksperimenta



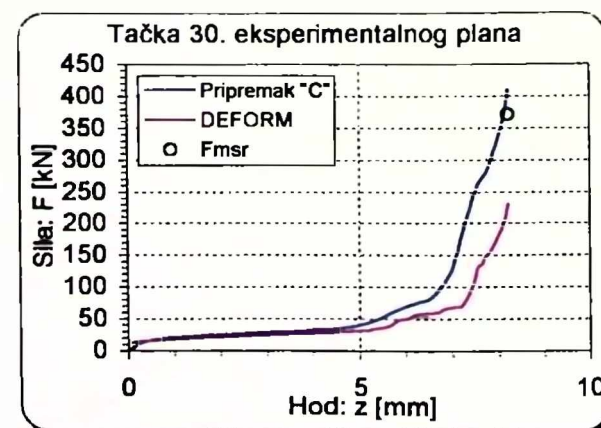
Slika P.2.27. Deformacione sile u 27. tački plana eksperimenta



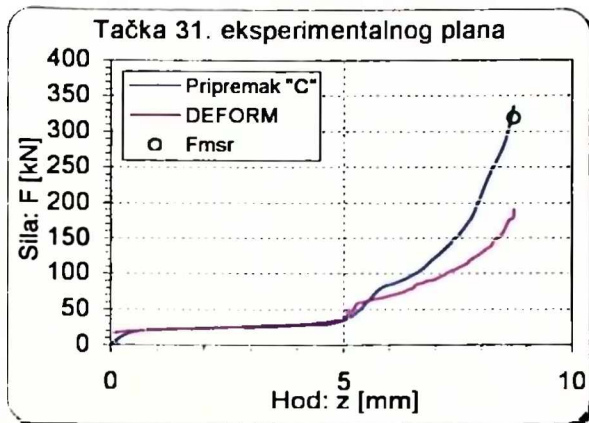
Slika P.2.28. Deformacione sile u 28. tački plana eksperimenta



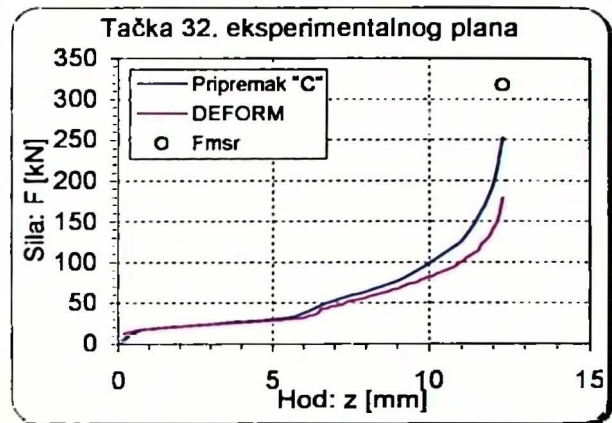
Slika P.2.29. Deformacione sile u 29. tački plana eksperimenta



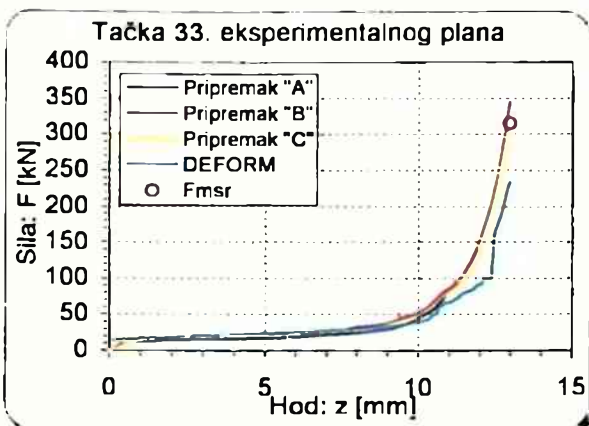
Slika P.2.30. Deformacione sile u 30. tački plana eksperimenta



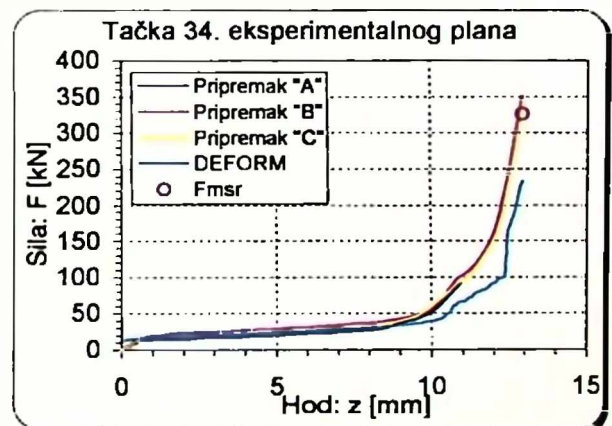
Slika P.2.31. Deformacione sile u 31. tački plana eksperimenta



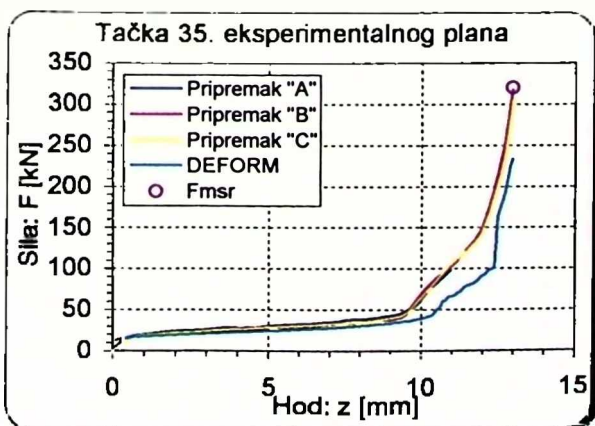
Slika P.2.32. Deformacione sile u 32. tački plana eksperimenta



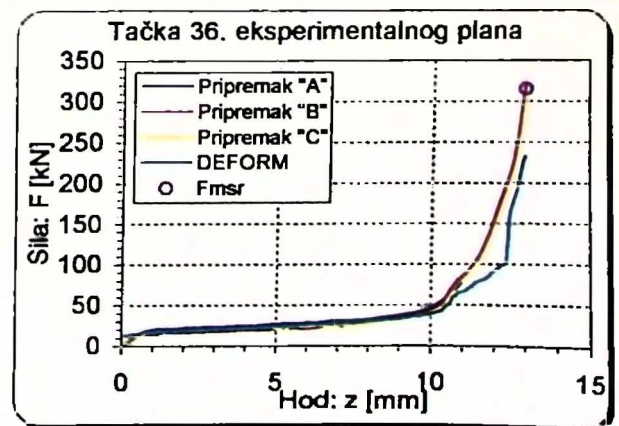
Slika P.2.33. Deformacione sile u 33. tački plana eksperimenta



Slika P.2.34. Deformacione sile u 34. tački plana eksperimenta



Slika P.2.35. Deformacione sile u 35. tački plana eksperimenta



Slika P.2.36. Deformacione sile u 36. tački plana eksperimenta

Program P.3.1. Određivanje komponenata logaritamskih deformacija

```

clear
for u=1:20
    eval(['load rb' int2str(u) 'x.txt']); eval(['load rb' int2str(u) 'y.txt'])
    eval(['load zb' int2str(u) 'x.txt']); eval(['load zb' int2str(u) 'y.txt'])
    eval(['load r0' int2str(u) '.dat']); eval(['load z0' int2str(u) '.dat'])
    eval(['rbx=rb' int2str(u) 'x;']) eval(['rby=rb' int2str(u) 'y;'])
    eval(['zbx=zb' int2str(u) 'x;']) eval(['zby=zb' int2str(u) 'y;'])
    eval(['r0=r0' int2str(u) '.;']) eval(['z0=z0' int2str(u) '.;'])
    [ir,jr]=size(rbx); [iz,jz]=size(zbx); s=ceil(jr/2);
    rbx(:,s)=(interp1(rby(:,s-1),rbx(:,s-1),rby(:,s),'cubic','extrap')+interp1(rby(:,s+1),rbx(:,s+1),rby(:,s),'cubic','extrap')))/2;
    for k=1:length(zbx(:,1))
        for l=1:length(rby(1,:))
            x1=rbx(:,l); y1=rby(:,l); x2=zbx(k,:); y2=zby(k,:);
            for i=1:length(x1)-1
                for j=1:length(x2)-1
                    if (x1(i)==x2(j) & y1(i)==y2(j)) | (x1(i)==x2(j+1) & y1(i)==y2(j+1))
                        X=x1(i); Y=y1(i);
                    elseif (x1(i+1)==x2(j) & y1(i+1)==y2(j)) | (x1(i+1)==x2(j+1) & y1(i+1)==y2(j+1))
                        X=x1(i+1); Y=y1(i+1);
                    else
                        if x1(i)==x1(i+1) & x2(j)==x2(j+1)
                            X=x1(i); Y=interp1(x2(j:j+1),y2(j:j+1),x1(i));
                        elseif y1(i)==y1(i+1) & y2(j)==y2(j+1)
                            Y=y1(i); X=interp1(y2(j:j+1),x2(j:j+1),y1(i));
                        elseif x2(j)==x2(j+1) & x1(i)==x1(i+1)
                            X=x2(j); Y=interp1(x1(i:i+1),y1(i:i+1),x2(j));
                        elseif y2(j)==y2(j+1) & y1(i)==y1(i+1)
                            Y=y2(j); X=interp1(y1(i:i+1),x1(i:i+1),y2(j));
                        elseif x1(i+1)==x1(i) & x2(j+1)==x2(j)
                            D=[(y1(i+1)-y1(i))./(x1(i+1)-x1(i))-1; (y2(j+1)-y2(j))./(x2(j+1)-x2(j))-1];
                            Dx=[((y1(i+1)-y1(i))./(x1(i+1)-x1(i)))*x1(i)-y1(i)-1; ((y2(j+1)-y2(j))./(x2(j+1)-x2(j)))*x2(j)-y2(j)-1];
                            Dy=[(y1(i+1)-y1(i))./(x1(i+1)-x1(i)) ((y1(i+1)-y1(i))./(x1(i+1)-x1(i)))*x1(i)-y1(i)
                                (y2(j+1)-y2(j))./(x2(j+1)-x2(j)) ((y2(j+1)-y2(j))./(x2(j+1)-x2(j)))*x2(j)-y2(j)];
                            if det(D)==0
                                X=det(Dx)/det(D); Y=det(Dy)/det(D);
                            end
                        end
                    end
                    if ((x1(i)<=X & X<=x1(i+1))|(x1(i)>=X & X>=x1(i+1))) & ((x2(j)<=Y & Y<=x2(j+1))|(x2(j)>=Y & Y>=x2(j+1))) & ...
                        ((y1(i)<=Y & Y<=y1(i+1))|(y1(i)>=Y & Y>=y1(i+1))) & ((y2(j)<=Y & Y<=y2(j+1))|(y2(j)>=Y & Y>=y2(j+1)))
                        xp(k,l)=X; yp(k,l)=Y;
                    end
                end
            end
        end
    end
    ur=interp1(r0(i,:),ur(i,:),r,'cubic'); uzr=interp1(r0(i,:),uz(i,:),r,'cubic');
    dur_dr0=diff(urr)/diff(r); duz_dr0=diff(uzr)/diff(r);
    dur_dr=[dur_dr;interp1(dr0,dur_dr0,r0(i,:),r,'cubic')]; duz_dr=[duz_dr;interp1(dz0,duz_dr0,r0(i,:),r,'cubic')];
end
duz_dz=[]; dur_dz=[];
for j=1:jr
    uzz=interp1(z0(:,j),uz(:,j),z,'cubic'); urz=interp1(z0(:,j),ur(:,j),z,'cubic');
    duz_dz0=diff(uzz)/diff(z); dur_dz0=diff(urz)/diff(z);
    duz_dz=[duz_dz;interp1(dz0,duz_dz0,z0(:,j),z,'cubic')]; dur_dz=[dur_dz;interp1(dz0,dur_dz0,z0(:,j),z,'cubic')];
end
fr=log(1+dur_dr);
fz=log(1+duz_dz);
ft=log(xp./r0);
grz=(dur_dz+duz_dr)/2;
L=10;dl=0.3;rxl=[];ryl=[];K=[];pi1l=[];rz1l=[];pi1=[];rz1=[];fr_r1=[];fz_r1=[];ft_r1=[];grz_r1=[];ur_r1=[];uz_r1=[];

```

```

for l=1:jr
    for i=1:ir-1
        rx1=[rx1;rbx(i,l)]; ry1=[ry1;rby(i,l)];
        for j=1:length(xp(:,l))
            if ((rbx(i,l)<=xp(j,l) & xp(j,l)<=rbx(i+1,l)) | (rbx(i,l)>=xp(j,l) & xp(j,l)>=rbx(i+1,l))) & ((rby(i,l)<=yp(j,l) & ...
                yp(j,l)<=rby(i+1,l)) | (rby(i,l)>=yp(j,l) & yp(j,l)>=rby(i+1,l)))
                rx1=[rx1;xp(j,l)]; ry1=[ry1;yp(j,l)];
            end
        end
    end
    rx=rx1(1); ry=ry1(1);
    for i=2:length(rx1)
        if rx1(i)~=rx1(i-1) | ry1(i)~=ry1(i-1)
            rx=[rx;rx1(i)]; ry=[ry;ry1(i)];
        end
    end
    lrp=cumsum([0;sqrt(diff(rx).^2+diff(ry).^2)]);
    for i=1:length(lrp)
        for j=1:length(xp(:,l))
            if rx(i)==xp(j,l) & ry(i)==yp(j,l)
                K=[K;i];
            end
        end
    end
    lrp0=lrp(K(1));
    for i=1:length(K)-1
        lrp0=[lrp0;(lrp(K(i+1))-(lrp(K(i)))/L:(lrp(K(i+1))-lrp(K(i)))/L:lrp(K(i+1)))];
    end
    ft_r1=[ft_r1 interp1(lrp(K),ft(:,l),lrp0,'cubic')]; fz_r1=[fz_r1 interp1(lrp(K),fz(:,l),lrp0,'cubic')];
    ft_z1=[ft_z1 interp1(lrp(K),ft(:,l),lrp0,'cubic')]; grz_r1=[grz_r1 interp1(lrp(K),grz(:,l),lrp0,'cubic')];
    ur_r1=[ur_r1 interp1(lrp(K),ur(:,l),lrp0,'cubic')]; uz_r1=[uz_r1 interp1(lrp(K),uz(:,l),lrp0,'cubic')];
    rz1=[rz1 interp1(lrp,rx,lrp0,'cubic')]; rz1=[rz1 interp1(lrp,ry,lrp0,'cubic')];
    rx1=[];ry1=[];K=[];
end
zx1=[];zy1=[];K=[];zx1l=[];zz1l=[];zr1=[];zz1=[];ft_z1=[];fz_z1=[];ft_z1=[];grz_z1=[];ur_z1=[];uz_z1=[];
for l=1:iz
    for i=1:jz-1
        zx1=[zx1 zbx(l,i)]; zy1=[zy1 zby(l,i)];
        for j=1:length(xp(1,:))
            if ((zbx(l,i)<=xp(l,j) & xp(l,j)<=zbx(l,i+1)) | (zbx(l,i)>=xp(l,j) & xp(l,j)>=zbx(l,i+1))) & ((zby(l,i)<=yp(l,j) & ...
                yp(l,j)<=zby(l,i+1)) | (zby(l,i)>=yp(l,j) & yp(l,j)>=zby(l,i+1)))
                zx1=[zx1 xp(l,j)]; zy1=[zy1 yp(l,j)];
            end
        end
    end
    [zx1]=unique(zx1); zy=zy1(1);
    lzp=cumsum([0 sqrt(diff(zx).^2+diff(zy).^2)]);
    for i=1:length(lzp)
        for j=1:length(xp(1,:))
            if zx(i)==xp(l,j) & zy(i)==yp(l,j)
                K=[K i];
            end
        end
    end
    lzp0=lzp(K(1));
    for i=1:length(K)-1
        lzp0=[lzp0;lzp(K(i+1))-(lzp(K(i)))/L:(lzp(K(i+1))-lzp(K(i)))/L:lzp(K(i+1)))];
    end
    fr_z1=[fr_z1;interp1(lzp(K),fr(l,:),lzp0,'cubic')]; fz_z1=[fz_z1;interp1(lzp(K),fz(l,:),lzp0,'cubic')];
    ft_z1=[ft_z1;interp1(lzp(K),ft(l,:),lzp0,'cubic')]; grz_z1=[grz_z1;interp1(lzp(K),grz(l,:),lzp0,'cubic')];
    ur_z1=[ur_z1;interp1(lzp(K),ur(l,:),lzp0,'cubic')]; uz_z1=[uz_z1;interp1(lzp(K),uz(l,:),lzp0,'cubic')];
    zr1=[zr1;interp1(lzp,zx,lzp0,'cubic')]; zz1=[zz1;interp1(lzp,zy,lzp0,'cubic')];
    zx1=[];zy1=[];K=[];
end
H1=kal(u,1); H2=kal(u,2); D1=kal(u,3); D0=40; H0=10; alf=4*pi/180; D=40; hv=1;
G0=[0 H0+hv+H1+H2]; G1=[D1/2-H2*tan(alf)-1 H0+hv+H1+H2]; G2=[D1/2+(1-H2)*tan(alf) H0+hv+H1+H2-1];
G3=[D1/2-tan(alf) H0+hv+H1+1]; G4=[D1/2+1 H0+hv+H1]; G5=[D/2-H1*tan(alf)-1 H0+hv+H1];

```



```

G6=[D/2+(1-H1)*tan(alf) H0+hv+H1-1]; G7=[D/2-tan(alf) H0+hv+1]; G8=[D/2+1 H0+hv]; G9=[30 H0+hv];
xg2=(G1(1):(G2(1)-G1(1))/10:G2(1)); xg4=(G3(1):(G4(1)-G3(1))/10:G4(1));
xg6=(G5(1):(G6(1)-G5(1))/10:G6(1)); xg8=(G7(1):(G8(1)-G7(1))/10:G8(1));
yg2=(G1(2)-1+sqrt(1-((xg2-G1(1))/(1+tan(alf))).^2)); yg4=(G4(2)+1-sqrt(1-((xg4-G4(1))/(1+tan(alf))).^2));
yg6=(G5(2)-1+sqrt(1-((xg6-G5(1))/(1+tan(alf))).^2)); yg8=(G8(2)+1-sqrt(1-((xg8-G8(1))/(1+tan(alf))).^2));
xg=[G0(1) xg2 xg4 xg6 xg8 G9(1)]; yg=[G0(2) yg2 yg4 yg6 yg8 G9(2)];
Dd1=[0 0]; D2=[D0/2-H0*tan(alf)-1 0]; D3=[D0/2+(1-H0)*tan(alf) 1];
D4=[D0/2-tan(alf) H0-1]; D5=[D0/2+1 H0]; D6=[30 H0];
xd2=D2(1):(D3(1)-D2(1))/10:D3(1); xd4=D4(1):(D5(1)-D4(1))/10:D5(1);
yd2=(D2(2)+1-sqrt(1-((xd2-D2(1))/(1+tan(alf))).^2)); yd4=(D5(2)-1+sqrt(1-((xd4-D5(1))/(1+tan(alf))).^2));
xd=[Dd1(1) xd2 xd4 D6(1)]; yd=[Dd1(2) yd2 yd4 D6(2)];
xbr=[]; ybr=[];
for i=1:ir
    if H0+hv>=rby(i,jr)& rby(i,jr)>=H0
        xbr=[xbr rby(i,jr)]; ybr=[ybr rby(i,jr)];
    end
end
xbl=[]; ybl=[];
for i=1:ir
    if H0+hv>=rby(i,1)& rby(i,1)>=H0
        xbl=[xbl rby(i,1)]; ybl=[ybl rby(i,1)];
    end
end
ybv=H0+hv:-hv/10:H0;
xbr1=interp1(ybr(2:length(xbr)-1),xbr(2:length(xbr)-1),ybv,'cubic');
xbl1=interp1(ybl(2:length(xbl)-1),xbl(2:length(xbl)-1),ybv,'cubic');
xbv=(xbr1-xbl1)/2;
zp1=H0+hv+H1+H2:-H2/10:H0+hv+H1; zp2=H0+hv+H1:-H1/10:H0+hv; zp3=H0+hv:-hv/2:H0; zp4=H0:-H0/10:0;
r1=[]; z1=[];
for i=1:11
    r1=[r1;0:interp1([yg2 yg4],[xg2 xg4],zp1(i))/20:interp1([yg2 yg4],[xg2 xg4],zp1(i))]; z1=[z1;zp1(i)*ones(1,21)];
end
for i=1:11
    r1=[r1;0:interp1([yg6 yg8],[xg6 xg8],zp2(i))/20:interp1([yg6 yg8],[xg6 xg8],zp2(i))]; z1=[z1;zp2(i)*ones(1,21)];
end
for i=1:3
    r1=[r1;0:interp1(ybv,xbv,zp3(i))/20:interp1(ybv,xbv,zp3(i))]; z1=[z1;zp3(i)*ones(1,21)];
end
for i=1:11
    r1=[r1;0:interp1([yd2 yd4],[xd2 xd4],zp4(i))/20:interp1([yd2 yd4],[xd2 xd4],zp4(i))]; z1=[z1;zp4(i)*ones(1,21)];
end
r=[-fliplr(r1(:,2:21)) r1]; z=[z1(:,2:21) z1];
fr=ones(1,41); fz=ones(1,41); ft=ones(1,41); grz=ones(1,41); ur=ones(1,41); uz=ones(1,41);
for k=2:35
    fp=[]; fzp=[]; ftp=[]; grzp=[]; urp=[]; uzp=[]; xpp=[];
    for i=1:length(rz1(:,1))-1
        for j=1:length(rz1(1,:))
            if ((rz1(i,j)<=z(k,1) & z(k,1)<=rz1(i+1,j)) | (rz1(i,j)>=z(k,1) & z(k,1)>=rz1(i+1,j))) & rz1(i,j)~=rz1(i+1,j)
                frp=[frp interp1(rz1(i:i+1,j),fr_r1(i:i+1,j),z(k,1),'linear','extrap')];
                fzp=[fzp interp1(rz1(i:i+1,j),fz_r1(i:i+1,j),z(k,1),'linear','extrap')];
                ftp=[ftp interp1(rz1(i:i+1,j),ft_r1(i:i+1,j),z(k,1),'linear','extrap')];
                grzp=[grzp interp1(rz1(i:i+1,j),grz_r1(i:i+1,j),z(k,1),'linear','extrap')];
                urp=[urp interp1(rz1(i:i+1,j),ur_r1(i:i+1,j),z(k,1),'linear','extrap')];
                uzp=[uzp interp1(rz1(i:i+1,j),uz_r1(i:i+1,j),z(k,1),'linear','extrap')];
                xpp=[xpp interp1(rz1(i:i+1,j),rr1(i:i+1,j),z(k,1),'linear','extrap')];
            end
        end
    end
    for i=1:length(zz1(:,1))
        for j=1:length(zz1(1,:))-1
            if ((zz1(i,j)<=z(k,1) & z(k,1)<=zz1(i,j+1)) | (zz1(i,j)>=z(k,1) & z(k,1)>=zz1(i,j+1))) & zz1(i,j)~=zz1(i,j+1)
                frp=[frp interp1(zz1(i,j:j+1),fr_z1(i,j:j+1),z(k,1),'linear','extrap')];
                fzp=[fzp interp1(zz1(i,j:j+1),fz_z1(i,j:j+1),z(k,1),'linear','extrap')];
                ftp=[ftp interp1(zz1(i,j:j+1),ft_z1(i,j:j+1),z(k,1),'linear','extrap')];
                grzp=[grzp interp1(zz1(i,j:j+1),grz_z1(i,j:j+1),z(k,1),'linear','extrap')];
                urp=[urp interp1(zz1(i,j:j+1),ur_z1(i,j:j+1),z(k,1),'linear','extrap')];
                uzp=[uzp interp1(zz1(i,j:j+1),uz_z1(i,j:j+1),z(k,1),'linear','extrap')];
            end
        end
    end
end

```

```

    xpp=[xpp interp1(zz1(i,j:j+1),zr1(i,j:j+1),z(k,1),'linear','extrap')];
end
end
end
[xpp,l]=unique(xpp); frp=frp(l); fzp=fzp(l); flp=flp(l); grzp=grzp(l); urp=urp(l); uzp=uzp(l);
fr=[fr;interp1(xpp,frp,r(k,:),'linear','extrap')]; fz=[fz;interp1(xpp,fzp,r(k,:),'linear','extrap')];
ft=[ft;interp1(xpp,flp,r(k,:),'linear','extrap')]; grz=[grz;interp1(xpp,grzp,r(k,:),'linear','extrap')];
ur=[ur;interp1(xpp,urp,r(k,:),'linear','extrap')]; uz=[uz;interp1(xpp,uzp,r(k,:),'linear','extrap')];
end
for k=1:41
    frp=[]; fzp=[]; flp=[]; grzp=[]; urp=[]; uzp=[]; ypp=[];
    for i=1:length(r1(:,1))-1
        for j=1:length(r1(1,:))
            if ((r1(i,j)<=r(1,k) & r(1,k)<=r1(i+1,j)) | (r1(i,j)>=r(1,k) & r(1,k)>=r1(i+1,j))) & r1(i,j)~=r1(i+1,j)
                frp=[frp interp1(r1(i:i+1,j),fr_r1(i:i+1,j),r(1,k),'linear','extrap')];
                fzp=[fzp interp1(r1(i:i+1,j),fz_r1(i:i+1,j),r(1,k),'linear','extrap')];
                flp=[flp interp1(r1(i:i+1,j),fl_r1(i:i+1,j),r(1,k),'linear','extrap')];
                grzp=[grzp interp1(r1(i:i+1,j),grz_r1(i:i+1,j),r(1,k),'linear','extrap')];
                ypp=[ypp interp1(r1(i:i+1,j),rz1(i:i+1,j),r(1,k),'linear','extrap')];
                urp=[urp interp1(r1(i:i+1,j),ur_r1(i:i+1,j),r(1,k),'linear','extrap')];
                uzp=[uzp interp1(r1(i:i+1,j),uz_r1(i:i+1,j),r(1,k),'linear','extrap')];
            end
        end
    end
    for i=1:length(zr1(:,1))
        for j=1:length(zr1(1,:))-1
            if ((zr1(i,j)<=r(1,k) & r(1,k)<=zr1(i,j+1)) | (zr1(i,j)>=r(1,k) & r(1,k)>=zr1(i,j+1))) & zr1(i,j)~=zr1(i,j+1)
                frp=[frp interp1(zr1(i,j:j+1),fr_z1(i,j:j+1),r(1,k),'linear','extrap')];
                fzp=[fzp interp1(zr1(i,j:j+1),fz_z1(i,j:j+1),r(1,k),'linear','extrap')];
                flp=[flp interp1(zr1(i,j:j+1),fl_z1(i,j:j+1),r(1,k),'linear','extrap')];
                grzp=[grzp interp1(zr1(i,j:j+1),grz_z1(i,j:j+1),r(1,k),'linear','extrap')];
                ypp=[ypp interp1(zr1(i,j:j+1),zz1(i,j:j+1),r(1,k),'linear','extrap')];
                urp=[urp interp1(zr1(i,j:j+1),ur_z1(i,j:j+1),r(1,k),'linear','extrap')];
                uzp=[uzp interp1(zr1(i,j:j+1),uz_z1(i,j:j+1),r(1,k),'linear','extrap')];
            end
        end
    end
    [ypp,l]=unique(ypp); frp=frp(l); fzp=fzp(l); flp=flp(l); grzp=grzp(l); urp=urp(l); uzp=uzp(l);
    fr(1,k)=interp1(ypp,frp,z(1,k),'linear','extrap'); fz(1,k)=interp1(ypp,fzp,z(1,k),'linear','extrap');
    ft(1,k)=interp1(ypp,flp,z(1,k),'linear','extrap'); grz(1,k)=interp1(ypp,grzp,z(1,k),'linear','extrap');
    ur(1,k)=interp1(ypp,urp,z(1,k),'linear','extrap'); uz(1,k)=interp1(ypp,uzp,z(1,k),'linear','extrap');
end
for k=1:41
    frp=[]; fzp=[]; flp=[]; grzp=[]; ypp=[]; urp=[]; uzp=[];
    for i=1:length(r1(:,1))-1
        for j=1:length(r1(1,:))
            if ((r1(i,j)<=r(36,k) & r(36,k)<=r1(i+1,j)) | (r1(i,j)>=r(36,k) & r(36,k)>=r1(i+1,j))) & r1(i,j)~=r1(i+1,j)
                frp=[frp interp1(r1(i:i+1,j),fr_r1(i:i+1,j),r(36,k),'linear','extrap')];
                fzp=[fzp interp1(r1(i:i+1,j),fz_r1(i:i+1,j),r(36,k),'linear','extrap')];
                flp=[flp interp1(r1(i:i+1,j),fl_r1(i:i+1,j),r(36,k),'linear','extrap')];
                grzp=[grzp interp1(r1(i:i+1,j),grz_r1(i:i+1,j),r(36,k),'linear','extrap')];
                ypp=[ypp interp1(r1(i:i+1,j),rz1(i:i+1,j),r(36,k),'linear','extrap')];
                urp=[urp interp1(r1(i:i+1,j),ur_r1(i:i+1,j),r(36,k),'linear','extrap')];
                uzp=[uzp interp1(r1(i:i+1,j),uz_r1(i:i+1,j),r(36,k),'linear','extrap')];
            end
        end
    end
    for i=1:length(zr1(:,1))
        for j=1:length(zr1(1,:))-1
            if ((zr1(i,j)<=r(36,k) & r(36,k)<=zr1(i,j+1)) | (zr1(i,j)>=r(36,k) & r(36,k)>=zr1(i,j+1))) & zr1(i,j)~=zr1(i,j+1)
                frp=[frp interp1(zr1(i,j:j+1),fr_z1(i,j:j+1),r(36,k),'linear','extrap')];
                fzp=[fzp interp1(zr1(i,j:j+1),fz_z1(i,j:j+1),r(36,k),'linear','extrap')];
                flp=[flp interp1(zr1(i,j:j+1),fl_z1(i,j:j+1),r(36,k),'linear','extrap')];
                grzp=[grzp interp1(zr1(i,j:j+1),grz_z1(i,j:j+1),r(36,k),'linear','extrap')];
                ypp=[ypp interp1(zr1(i,j:j+1),zz1(i,j:j+1),r(36,k),'linear','extrap')];
                urp=[urp interp1(zr1(i,j:j+1),ur_z1(i,j:j+1),r(36,k),'linear','extrap')];
                uzp=[uzp interp1(zr1(i,j:j+1),uz_z1(i,j:j+1),r(36,k),'linear','extrap')];
            end
        end
    end

```

```

        end
    end
end
[ypp,l]=unique(yp); frp=frp(l); fzp=fzp(l); flp=flp(l); grzp=grzp(l); urp=urp(l); uzp=uzp(l);
fr(36,k)=interp1(ypp,frp,z(36,k),'linear','extrap'); fz(36,k)=interp1(ypp,fzp,z(36,k),'linear','extrap');
fl(36,k)=interp1(ypp,flp,z(36,k),'linear','extrap'); grz(36,k)=interp1(ypp,grzp,z(36,k),'linear','extrap');
ur(36,k)=interp1(ypp,urp,z(36,k),'linear','extrap'); uz(36,k)=interp1(ypp,uzp,z(36,k),'linear','extrap');
end
r=r(:,21:41); z=z(:,21:41);
fr=[fr(:,21) (fliplr(fr(:,1:20))+fr(:,22:41))/2]; fz=[fz(:,21) (fliplr(fz(:,1:20))+fz(:,22:41))/2];
fl=[fl(:,21) (fliplr(fl(:,1:20))+fl(:,22:41))/2]; grz=[grz(:,21) (-fliplr(grz(:,1:20))+grz(:,22:41))/2];
fe=sqrt(2)*sqrt((fr-fl).^2+(fl-fz).^2+(fr-fz).^2+3*(grz.^2)/2)/3;
eval(['save f int2str(u) ' fr fz fl grz fe r z xp yp'])
clear
end

```



Program P.3.2. Određivanje komponenata brzina deformacija

```

clear
for u=1:20
    eval(['load ra' int2str(u) 'x.txt']); eval(['load ra' int2str(u) 'y.txt'])
    eval(['load za' int2str(u) 'x.txt']); eval(['load za' int2str(u) 'y.txt'])
    eval(['rbx=ra' int2str(u) 'x;']); eval(['rby=ra' int2str(u) 'y;'])
    eval(['zbx=za' int2str(u) 'x;']); eval(['zby=za' int2str(u) 'y;'])
    [ir,jr]=size(rbx); [iz,jz]=size(zbx); s=ceil(jr/2);
    rbx(:,s)=(interp1(rby(:,s-1),rbx(:,s-1),rby(:,s),'cubic','extrap')+interp1(rby(:,s+1),rbx(:,s+1),rby(:,s),'cubic','extrap')))/2;
    for k=1:length(zbx(:,1))
        for l=1:length(rby(1,:))
            x1=rbx(:,l); y1=rby(:,l); x2=zbx(k,:); y2=zby(k,:);
            for i=1:length(x1)-1
                for j=1:length(x2)-1
                    if (x1(i)==x2(j) & y1(i)==y2(j)) | (x1(i)==x2(j+1) & y1(i)==y2(j+1))
                        X=x1(i); Y=y1(i);
                    elseif (x1(i+1)==x2(j) & y1(i+1)==y2(j)) | (x1(i+1)==x2(j+1) & y1(i+1)==y2(j+1))
                        X=x1(i+1); Y=y1(i+1);
                    else
                        if x1(i)==x1(i+1) & x2(j)~=x2(j+1)
                            X=x1(i); Y=interp1(x2(j:j+1),y2(j:j+1),x1(i));
                        elseif y1(i)==y1(i+1) & y2(j)~=y2(j+1)
                            Y=y1(i); X=interp1(y2(j:j+1),x2(j:j+1),y1(i));
                        elseif x2(j)==x2(j+1) & x1(i)~=x1(i+1)
                            X=x2(j); Y=interp1(x1(i:i+1),y1(i:i+1),x2(j));
                        elseif y2(j)==y2(j+1) & y1(i)~=y1(i+1)
                            Y=y2(j); X=interp1(y1(i:i+1),x1(i:i+1),y2(j));
                        else
                            D=[(y1(i+1)-y1(i))/(x1(i+1)-x1(i))-1; (y2(j+1)-y2(j))/(x2(j+1)-x2(j))-1];
                            Dx=[((y1(i+1)-y1(i))/(x1(i+1)-x1(i)))*x1(i)-y1(i)-1; ((y2(j+1)-y2(j))/(x2(j+1)-x2(j)))*x2(j)-y2(j)-1];
                            Dy=[(y1(i+1)-y1(i))/(x1(i+1)-x1(i)) ((y1(i+1)-y1(i))/(x1(i+1)-x1(i)))*x1(i)-y1(i)
                                (y2(j+1)-y2(j))/(x2(j+1)-x2(j)) ((y2(j+1)-y2(j))/(x2(j+1)-x2(j)))*x2(j)-y2(j)];
                            if det(D)==0
                                X=det(Dx)/det(D); Y=det(Dy)/det(D);
                            end
                        end
                    end
                    if ((x1(i)<=X & X<=x1(i+1))(x1(i)>=X & X>=x1(i+1))) & ((x2(j)<=X & X<=x2(j+1))(x2(j)>=X & X>=x2(j+1))) & ...
                        ((y1(i)<=Y & Y<=y1(i+1))(y1(i)>=Y & Y>=y1(i+1))) & ((y2(j)<=Y & Y<=y2(j+1))(y2(j)>=Y & Y>=y2(j+1)))
                        xpa(k,l)=X; ypa(k,l)=Y;
                    end
                end
            end
        end
    end
    eval(['load rb' int2str(u) 'x.txt']); eval(['load rb' int2str(u) 'y.txt'])
    eval(['load zb' int2str(u) 'x.txt']); eval(['load zb' int2str(u) 'y.txt'])
    eval(['load r0' int2str(u) '.dat']); eval(['load z0' int2str(u) '.dat'])
    eval(['rbx=rb' int2str(u) 'x;']); eval(['rby=rb' int2str(u) 'y;'])
    eval(['zbx=zb' int2str(u) 'x;']); eval(['zby=zb' int2str(u) 'y;'])
    eval(['r0=r0' int2str(u) '.']); eval(['z0=z0' int2str(u) '.'])
    rbx(:,s)=(interp1(rby(:,s-1),rbx(:,s-1),rby(:,s),'cubic','extrap')+interp1(rby(:,s+1),rbx(:,s+1),rby(:,s),'cubic','extrap')))/2;
    eval(['load f' int2str(u)])
    dt=1; vr=(xp-xpa)/dt; uz=(yp-ypa)/dt;
    r=r0(1,1):(r0(1,jr)-r0(1,1))/100:r0(1,jr); dr0=r(1:100)+diff(r)/2;
    z=z0(1,1):(z0(1,jz)-z0(1,1))/100:z0(1,jz); dz0=z(1:100)+diff(z)/2;
    dvr_dr=[]; duz_dr=[];
    for i=1:iz
        vr=interp1(r0(i,:),vr(i,:),r,'cubic'); vz=interp1(r0(i,:),uz(i,:),r,'cubic');
        dvr_dr=diff(vr)/diff(r); duz_dr=diff(uz)/diff(r);
        dvr_dr=[dvr_dr;interp1(dr0,dvr_dr,r0(i,:),r,'cubic')]; duz_dr=[duz_dr;interp1(dr0,duz_dr,r0(i,:),r,'cubic')];
    end
    duz_dz=[]; dvr_dz=[];
    for j=1:jz
        vzz=interp1(z0(:,j),vz(:,j),z,'cubic'); vrz=interp1(z0(:,j),vr(:,j),z,'cubic');

```

```

dvz_dz0=diff(vzz)./diff(z); dvr_dz0=diff(vrz)./diff(z);
dvz_dz=[dvz_dz interp1(dz0,dvz_dz0,z0(:,j),'cubic')]; dvr_dz=[dvr_dz interp1(dz0,dvr_dz0,z0(:,j),'cubic')];
end
er=dvr_dr./exp(erb);
ez=log(1+dvz_dz);
et=vr./(xp.*exp(etb));
grz=(dvr_dz+dvz_dr)/2;
L=10; dl=0.3;
rxl=[];ryl=[];K=[];rxl1=[];ryl1=[];rzl=[];er_r1=[];ez_r1=[];et_r1=[];grz_r1=[];
for l=1:jr
    for i=1:ir-1
        rxl=[rxl;rbx(i,l)]; ryl=[ryl;rby(i,l)];
        for j=1:length(xp(:,l))
            if ((rbx(i,l)<=xp(j,l) & xp(j,l)<=rbx(i+1,l)) | (rbx(i,l)>=xp(j,l) & xp(j,l)>=rbx(i+1,l))) & ((rby(i,l)<=yp(j,l) & ...
                yp(j,l)<=rby(i+1,l)) | (rby(i,l)>=yp(j,l) & yp(j,l)>=rby(i+1,l)))
                rxl=[rxl;xp(j,l)]; ryl=[ryl;yp(j,l)];
            end
        end
    end
    rx=rxl(1); ry=ryl(1);
    for i=2:length(rxl)
        if rxl(i)~=rxl(i-1) | ryl(i)~=ryl(i-1)
            rx=[rx;rxl(i)]; ry=[ry;ryl(i)];
        end
    end
    lrp=cumsum([0;sqrt(diff(rx).^2+diff(ry).^2)]);
    for i=1:length(lrp)
        for j=1:length(xp(:,l))
            if rx(i)==xp(j,l) & ry(i)==yp(j,l)
                K=[K;i];
            end
        end
    end
    lrp0=lrp(K(1));
    for i=1:length(K)-1
        lrp0=[lrp0;(lrp(K(i+1))-lrp(K(i)))/L:(lrp(K(i+1))-lrp(K(i)))/L:lrp(K(i+1)))];
    end
    er_r1=[er_r1 interp1(lrp(K),er(:,l),lrp0,'cubic')]; ez_r1=[ez_r1 interp1(lrp(K),ez(:,l),lrp0,'cubic')];
    et_r1=[et_r1 interp1(lrp(K),et(:,l),lrp0,'cubic')]; grz_r1=[grz_r1 interp1(lrp(K),grz(:,l),lrp0,'cubic')];
    rxl1=[rxl1 interp1(lrp,rx,lrp0,'cubic')]; rzl=[rzl interp1(lrp,ry,lrp0,'cubic')];
    rxl=[];ryl=[];K=[];
end
zxl=[];zyl=[];K=[];zxl1=[];zyl1=[];zr1=[];zz1=[];er_z1=[];ez_z1=[];et_z1=[];grz_z1=[];
for l=1:iz
    for i=1:jz-1
        zxl=[zxl;zbx(l,i)]; zyl=[zyl;zby(l,i)];
        for j=1:length(xp(1,:))
            if ((zbx(l,i)<=xp(l,j) & xp(l,j)<=zbx(l,i+1)) | (zbx(l,i)>=xp(l,j) & xp(l,j)>=zbx(l,i+1))) & ((zby(l,i)<=yp(l,j) & ...
                yp(l,j)<=zby(l,i+1)) | (zby(l,i)>=yp(l,j) & yp(l,j)>=zby(l,i+1)))
                zxl=[zxl;xp(l,j)]; zyl=[zyl;yp(l,j)];
            end
        end
    end
    [zx,l]=unique(zxl); zy=zyl(1); lzp=cumsum([0 sqrt(diff(zx).^2+diff(zy).^2)]);
    for i=1:length(lzp)
        for j=1:length(xp(1,:))
            if zx(i)==xp(l,j) & zy(i)==yp(l,j)
                K=[K i];
            end
        end
    end
    lzp0=lzp(K(1));
    for i=1:length(K)-1
        lzp0=[lzp0;lzp(K(i+1))-lzp(K(i)))/L:(lzp(K(i+1))-lzp(K(i)))/L:lzp(K(i+1))];
    end
    er_z1=[er_z1;interp1(lzp(K),er(l,:),lzp0,'cubic')]; ez_z1=[ez_z1;interp1(lzp(K),ez(l,:),lzp0,'cubic')];
    et_z1=[et_z1;interp1(lzp(K),et(l,:),lzp0,'cubic')]; grz_z1=[grz_z1;interp1(lzp(K),grz(l,:),lzp0,'cubic')];

```

```

    zr1=[zr1;interp1(lzp,zx,lzp0,'cubic')]; zz1=[zz1;interp1(lzp,zy,lzp0,'cubic')];
    zx1=[];zy1=[];K=[];
end
load kal; H1=kal(u,1); H2=kal(u,2); D1=kal(u,3);
H0=10; alf=4*pi/180; D=40; hv=1;
G0=[0 H0+hv+H1+H2]; G1=[D1/2-H2*tan(alf)-1 H0+hv+H1+H2]; G2=[D1/2+(1-H2)*tan(alf) H0+hv+H1+H2-1];
G3=[D1/2-tan(alf) H0+hv+H1+1]; G4=[D1/2+1 H0+hv+H1]; G5=[D/2-H1*tan(alf)-1 H0+hv+H1];
G6=[D/2+(1-H1)*tan(alf) H0+hv+H1-1]; G7=[D/2-tan(alf) H0+hv+1]; G8=[D/2+1 H0+hv]; G9=[30 H0+hv];
xg2=(G1(1):(G2(1)-G1(1))/10:G2(1)); xg4=(G3(1):(G4(1)-G3(1))/10:G4(1));
xg6=(G5(1):(G6(1)-G5(1))/10:G6(1)); xg8=(G7(1):(G8(1)-G7(1))/10:G8(1));
yg2=(G1(2)-1+sqrt(1-((xg2-G1(1))/(1+tan(alf)))^2)); yg4=(G4(2)+1-sqrt(1-((xg4-G4(1))/(1+tan(alf)))^2));
yg6=(G5(2)-1+sqrt(1-((xg6-G5(1))/(1+tan(alf)))^2)); yg8=(G8(2)+1-sqrt(1-((xg8-G8(1))/(1+tan(alf)))^2));
yg=[G0(1) xg2 xg4 xg6 xg8 G9(1)]; yg=[G0(2) yg2 yg4 yg6 yg8 G9(2)];
Dd1=[0 0]; D2=[D/2-1*H0*tan(alf)-1 0]; D3=[D/2+(1-H0)*tan(alf) 1]; D4=[D/2-tan(alf) H0-1]; D5=[D/2+1 H0]; D6=[30 H0];
xd2=D2(1):(D3(1)-D2(1))/10:D3(1); xd4=D4(1):(D5(1)-D4(1))/10:D5(1);
yd2=(D2(2)+1-sqrt(1-((xd2-D2(1))/(1+tan(alf)))^2)); yd4=(D5(2)-1+sqrt(1-((xd4-D5(1))/(1+tan(alf)))^2));
xd=[Dd1(1) xd2 xd4 D6(1)]; yd=[Dd1(2) yd2 yd4 D6(2)];
xbr=[];ybr=[];
for i=1:ir
    if H0+hv>=rby(i,jr)& rby(i,jr)>=H0
        xbr=[xbr rby(i,jr)]; ybr=[ybr rby(i,jr)];
    end
end
xbl=[];ybl=[];
for i=1:ir
    if H0+hv>=rby(i,1)& rby(i,1)>=H0
        xbl=[xbl rby(i,1)]; ybl=[ybl rby(i,1)];
    end
end
ybv=H0+hv:-hv/10:H0; xbr1=interp1(ybr(2:length(xbr)-1),xbr(2:length(xbr)-1),ybv,'cubic');
xbl1=interp1(ybl(2:length(xbl)-1),xbl(2:length(xbl)-1),ybv,'cubic'); xbv=(xbr1-xbl1)/2;
zp1=H0+hv+H1+H2:-H2/10:H0+hv+H1; zp2=H0+hv+H1:-H1/10:H0+hv; zp3=H0+hv:-hv/2:H0; zp4=H0:-H0/10:0;
r1=[];z1=[];
for i=1:11
    r1=[r1;0:interp1([yg2 yg4],[xg2 xg4],zp1(i))/20:interp1([yg2 yg4],[xg2 xg4],zp1(i))]; z1=[z1;zp1(i)*ones(1,21)];
end
for j=1:11
    r1=[r1;0:interp1([yg6 yg8],[xg6 xg8],zp2(i))/20:interp1([yg6 yg8],[xg6 xg8],zp2(i))]; z1=[z1;zp2(i)*ones(1,21)];
end
for i=1:3
    r1=[r1;0:interp1(ybv,xbv,zp3(i))/20:interp1(ybv,xbv,zp3(i))]; z1=[z1;zp3(i)*ones(1,21)];
end
for i=1:11
    r1=[r1;0:interp1([yd2 yd4],[xd2 xd4],zp4(i))/20:interp1([yd2 yd4],[xd2 xd4],zp4(i))]; z1=[z1;zp4(i)*ones(1,21)];
end
r=[fliplr(r1(:,2:21)) r1]; z=[z1(:,2:21) z1];
er=ones(1,41); ez=ones(1,41); et=ones(1,41); grz=ones(1,41);
for k=2:35
    erp=[];ezp=[];etp=[];grzp=[];xpp=[];
    for i=1:length(rz1(:,1))-1
        for j=1:length(rz1(1,:))
            if ((rz1(i,j)<=z(k,1) & z(k,1)<=rz1(i+1,j)) | (rz1(i,j)>=z(k,1) & z(k,1)>=rz1(i+1,j))) & rz1(i,j)~=rz1(i+1,j)
                erp=[erp interp1(rz1(i:i+1,j),er_r1(i:i+1,j),z(k,1),'linear','extrap')];
                ezp=[ezp interp1(rz1(i:i+1,j),ez_r1(i:i+1,j),z(k,1),'linear','extrap')];
                etp=[etp interp1(rz1(i:i+1,j),et_r1(i:i+1,j),z(k,1),'linear','extrap')];
                grzp=[grzp interp1(rz1(i:i+1,j),grz_r1(i:i+1,j),z(k,1),'linear','extrap')];
                xpp=[xpp interp1(rz1(i:i+1,j),rr1(i:i+1,j),z(k,1),'linear','extrap')];
            end
        end
    end
end
for i=1:length(zz1(:,1))
    for j=1:length(zz1(1,:))-1
        if ((zz1(i,j)<=z(k,1) & z(k,1)<=zz1(i,j+1)) | (zz1(i,j)>=z(k,1) & z(k,1)>=zz1(i,j+1))) & zz1(i,j)~=zz1(i,j+1)
            erp=[erp interp1(zz1(i,j:j+1),er_z1(i,j:j+1),z(k,1),'linear','extrap')];
            ezp=[ezp interp1(zz1(i,j:j+1),ez_z1(i,j:j+1),z(k,1),'linear','extrap')];
            etp=[etp interp1(zz1(i,j:j+1),et_z1(i,j:j+1),z(k,1),'linear','extrap')];
            grzp=[grzp interp1(zz1(i,j:j+1),grz_z1(i,j:j+1),z(k,1),'linear','extrap')];
        end
    end
end

```



```

        xpp=[xpp interp1(zz1(i,j:j+1),zr1(i,j:j+1),z(k,1),'linear','extrap')];
    end
end
[xpp,l]=unique(xpp); erp=erp(l); ezp=ezp(l); etp=etp(l); grzp=grzp(l);
er=[er;interp1(xpp,erp,r(k,:), 'linear','extrap')]; ez=[ez;interp1(xpp,ezp,r(k,:), 'linear','extrap')];
et=[et;interp1(xpp,etp,r(k,:), 'linear','extrap')]; grz=[grz;interp1(xpp,grzp,r(k,:), 'linear','extrap')];
end
for k=1:41
    erp=[];ezp=[];etp=[];grzp=[];ypp=[];
    for i=1:length(r1(:,1))-1
        for j=1:length(r1(1,:))
            if ((r1(i,j)<=r(1,k) & r(1,k)<=r1(i+1,j)) | (r1(i,j)>=r(1,k) & r(1,k)>=r1(i+1,j))) & r1(i,j)~=r1(i+1,j)
                erp=[erp interp1(r1(i:i+1,j),er_r1(i:i+1,j),r(1,k),'linear','extrap')];
                ezp=[ezp interp1(r1(i:i+1,j),ez_r1(i:i+1,j),r(1,k),'linear','extrap')];
                etp=[etp interp1(r1(i:i+1,j),et_r1(i:i+1,j),r(1,k),'linear','extrap')];
                grzp=[grzp interp1(r1(i:i+1,j),grz_r1(i:i+1,j),r(1,k),'linear','extrap')];
                ypp=[ypp interp1(r1(i:i+1,j),rz1(i:i+1,j),r(1,k),'linear','extrap')];
            end
        end
    end
    for i=1:length(zr1(:,1))
        for j=1:length(zr1(1,:))-1
            if ((zr1(i,j)<=r(1,k) & r(1,k)<=zr1(i,j+1)) | (zr1(i,j)>=r(1,k) & r(1,k)>=zr1(i,j+1))) & zr1(i,j)~=zr1(i,j+1)
                erp=[erp interp1(zr1(i,j:j+1),er_z1(i,j:j+1),r(1,k),'linear','extrap')];
                ezp=[ezp interp1(zr1(i,j:j+1),ez_z1(i,j:j+1),r(1,k),'linear','extrap')];
                etp=[etp interp1(zr1(i,j:j+1),et_z1(i,j:j+1),r(1,k),'linear','extrap')];
                grzp=[grzp interp1(zr1(i,j:j+1),grz_z1(i,j:j+1),r(1,k),'linear','extrap')];
                ypp=[ypp interp1(zr1(i,j:j+1),zz1(i,j:j+1),r(1,k),'linear','extrap')];
            end
        end
    end
    [ypp,l]=unique(ypp); erp=erp(l); ezp=ezp(l); etp=etp(l); grzp=grzp(l);
    er(1,k)=interp1(ypp,erp,z(1,k),'linear','extrap'); ez(1,k)=interp1(ypp,ezp,z(1,k),'linear','extrap');
    et(1,k)=interp1(ypp,etp,z(1,k),'linear','extrap'); grz(1,k)=interp1(ypp,grzp,z(1,k),'linear','extrap');
end
for k=1:41
    erp=[];ezp=[];etp=[];grzp=[];ypp=[];
    for i=1:length(r1(:,1))-1
        for j=1:length(r1(1,:))
            if ((r1(i,j)<=r(36,k) & r(36,k)<=r1(i+1,j)) | (r1(i,j)>=r(36,k) & r(36,k)>=r1(i+1,j))) & r1(i,j)~=r1(i+1,j)
                erp=[erp interp1(r1(i:i+1,j),er_r1(i:i+1,j),r(36,k),'linear','extrap')];
                ezp=[ezp interp1(r1(i:i+1,j),ez_r1(i:i+1,j),r(36,k),'linear','extrap')];
                etp=[etp interp1(r1(i:i+1,j),et_r1(i:i+1,j),r(36,k),'linear','extrap')];
                grzp=[grzp interp1(r1(i:i+1,j),grz_r1(i:i+1,j),r(36,k),'linear','extrap')];
                ypp=[ypp interp1(r1(i:i+1,j),rz1(i:i+1,j),r(36,k),'linear','extrap')];
            end
        end
    end
    for i=1:length(zr1(:,1))
        for j=1:length(zr1(1,:))-1
            if ((zr1(i,j)<=r(36,k) & r(36,k)<=zr1(i,j+1)) | (zr1(i,j)>=r(36,k) & r(36,k)>=zr1(i,j+1))) & zr1(i,j)~=zr1(i,j+1)
                erp=[erp interp1(zr1(i,j:j+1),er_z1(i,j:j+1),r(36,k),'linear','extrap')];
                ezp=[ezp interp1(zr1(i,j:j+1),ez_z1(i,j:j+1),r(36,k),'linear','extrap')];
                etp=[etp interp1(zr1(i,j:j+1),et_z1(i,j:j+1),r(36,k),'linear','extrap')];
                grzp=[grzp interp1(zr1(i,j:j+1),grz_z1(i,j:j+1),r(36,k),'linear','extrap')];
                ypp=[ypp interp1(zr1(i,j:j+1),zz1(i,j:j+1),r(36,k),'linear','extrap')];
            end
        end
    end
    [ypp,l]=unique(ypp); erp=erp(l); ezp=ezp(l); etp=etp(l); grzp=grzp(l);
    er(36,k)=interp1(ypp,erp,z(36,k),'linear','extrap'); ez(36,k)=interp1(ypp,ezp,z(36,k),'linear','extrap');
    et(36,k)=interp1(ypp,etp,z(36,k),'linear','extrap'); grz(36,k)=interp1(ypp,grzp,z(36,k),'linear','extrap');
end
r=r(:,21:41); z=z(:,21:41);
er=[er(:,21) (fliplr(er(:,1:20))+er(:,22:41))/2]; ez=[ez(:,21) (fliplr(ez(:,1:20))+ez(:,22:41))/2];

```

```
et=[et(:,21) (fliplr(et(:,1:20))+et(:,22:41))/2]; grz=[grz(:,21) (-fliplr(grz(:,1:20))+grz(:,22:41))/2];  
cc=sqrt(2)*sqrt((er-et).^2+(et-ez).^2+(er-ez).^2+3*(grz.^2)/2)/3;  
grz(:,1)=zeros(36,1);  
est_r=er; est_z=ez; est_t=et; gst_rz=grz; est_e=fe;  
eval(['save est' int2str(u) ' est_r est_z est_t gst_rz est_e r z'])  
end
```

Program P.3.3. Određivanje komponenata napona

```

clear
for u=1:36
    if 1<=u & u<=16
        c=3.178335;
        n=0.071742;
        eval(['load f int2str(u)']);
        eval(['load est int2str(u)'])
    elseif 17<=u & u<=32
        c=2.834984;
        n=0.093921;
        eval(['load f int2str(u-16)']);
        eval(['load est int2str(u-16)'])
    else
        c=3.034434;
        n=0.097808;
        eval(['load f int2str(u-16)']);
        eval(['load est int2str(u-16)'])
    end
    f1=(est_z-est_r)./est_e;
    f2=(est_r-est_t)./(r.*est_e);
    f3=(gst_rz./est_e);
    se=c*fe.^n;
    l_pr=3*est_e./(2*se);
    trz=gst_rz./(2*l_pr);
    iv=24;
    df1_drv=izvod(r(iv,:),f1(iv,:),r(iv,:));
    for i=1:21
        [f3p,zp]=xpres1(r,z,f3,r(iv,i));
        [zp,J1]=unique(zp);
        f3p=f3p(J1);
        if length(zp)>1
            df3_dz(i)=izvod(zp,f3p,z(iv,1));
        else
            df3_dz(i)=df3_dz(i-1);
        end
    end
    F1=abs(2*se(iv,:).*(df1_drv-f2(iv,:)-df3_dz/2)/3);
    I1=integral(r(iv,2:21),F1(2:21));
    szvc=-2*se(iv,21).*((est_r(iv,21)-est_z(iv,21))./est_e(iv,21))/3;
    C1=szvc-I1(length(I1));
    szv=I1+C1;
    A=[r(iv,2).^2 1;r(iv,3).^2 1];
    B=[szv(1);szv(2)];
    X=A\B;
    szv=[X(2) szv];
    for i=1:36
        f4(i)=izvod(r(i,:),trz(i,:),0);
        f5(i)=interp1(r(i,2:21),trz(i,2:21)./r(i,2:21),0,'linear','extrap');
    end
    F2=-f4-f5;
    [z0,J2]=unique(z(:,1));
    F2=F2(J2);
    I2=integral(z0,F2);
    C2=szv(1)-interp1(z0,I2,z(24,1));
    szr0=I2+C2;
    sz=[];
    FF=[];
    II=[];
    CC=[];
    for i=1:36
        df1_dr=izvod(r(i,:),f1(i,:),r(i,:));
        for j=1:21
            [f3p,zp]=xpres1(r,z,f3,r(i,j));
            [zp,I]=unique(zp);

```

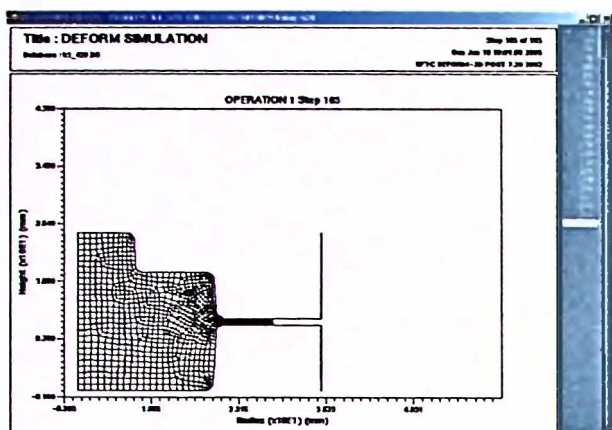


```

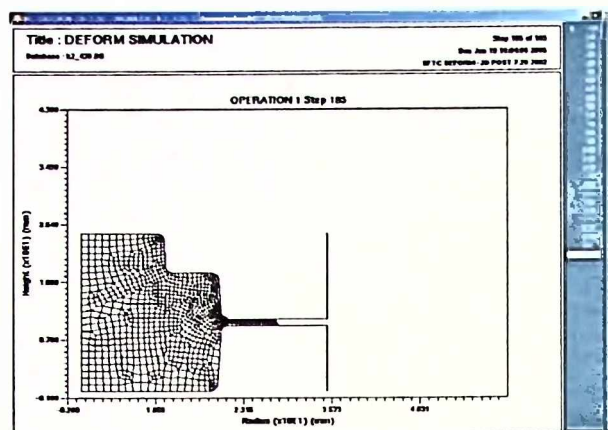
f3p=f3p(1);
if length(zp)>1
    df3_dz(j)=izvod(zp,f3p,z(i,1));
else
    df3_dz(j)=df3_dz(j-1);
end
end
F=abs(2*se(i,:).*(df1_dr-f2(i,:)-df3_dz)/3);
FF=[FF;F];
I=integral(r(i,2:21),F(2:21));
II=[II;I];
A=[r(i,2).^2 1;r(i,3).^2 1];
B=[I(1);I(2)];
X=A\B;
I=[X(2) I];
szo0c=interp1(z0,szo0,z(i,1));
C=szo0c-I(1);
CC=[CC;C];
sz=[sz;I+C];
end
sr=sz+2*se.*(est_r-est_z)./(3*est_e);
st=sz+2*se.*(est_t-est_z)./(3*est_e);
eval(['save s' int2str(u) ' sr sz st trz se r z'])
clear
end

```

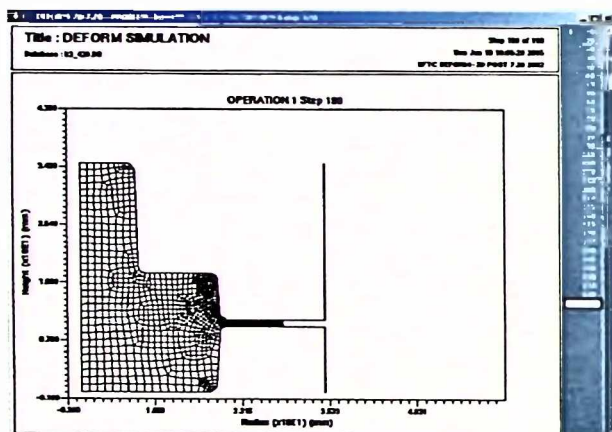




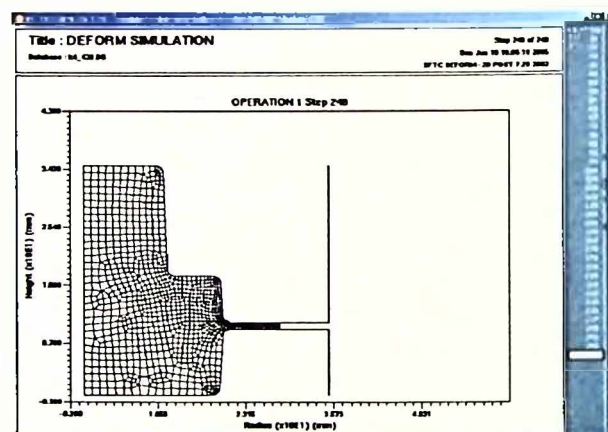
Slika P.4.1. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 1 plana eksperimenta



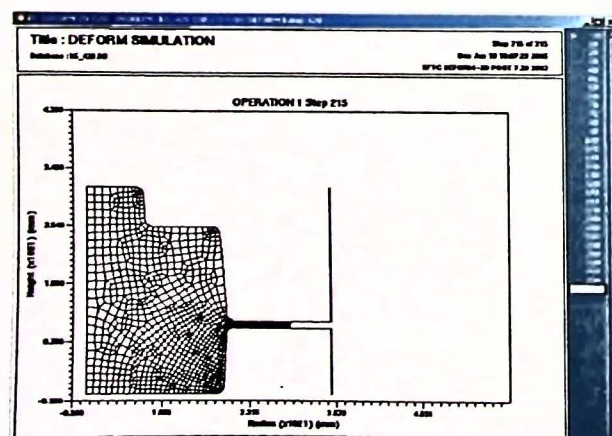
Slika P.4.2. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 2 plana eksperimenta



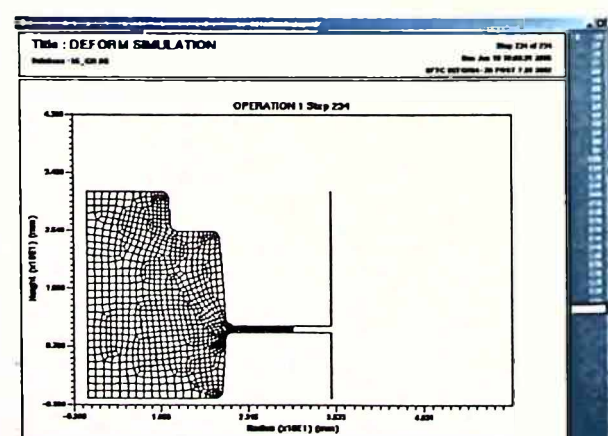
Slika P.4.3. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 3 plana eksperimenta



Slika P.4.4. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 4 plana eksperimenta

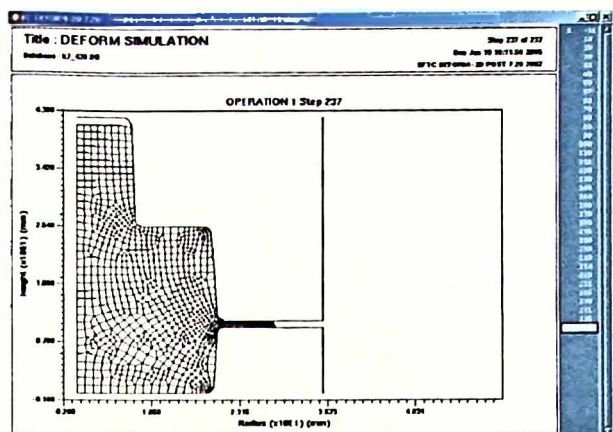


Slika P.4.5. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 5 plana eksperimenta

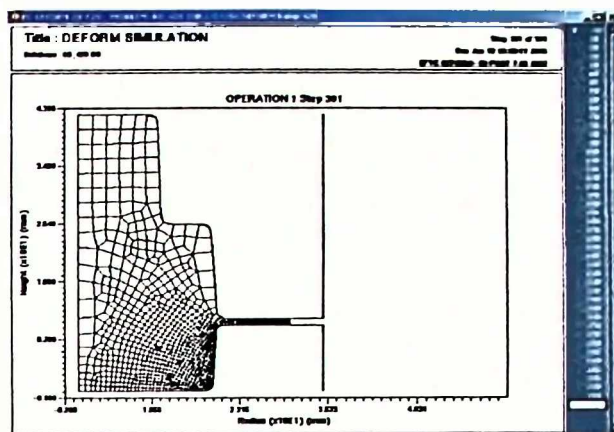


Slika P.4.6. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 6 plana eksperimenta

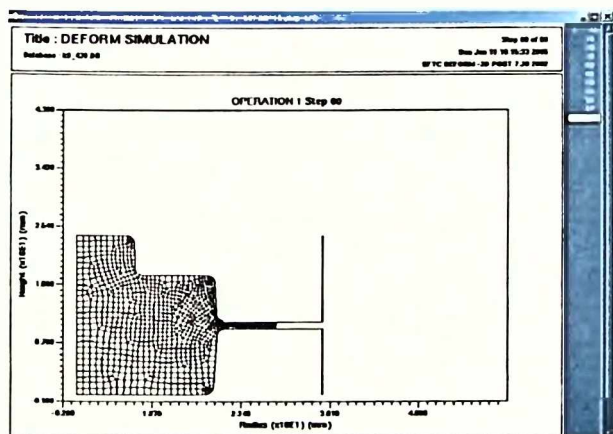
P.4. Mreže konačnih elemenata na kraju procesa deformisanja u tačkama plana eksperimenta



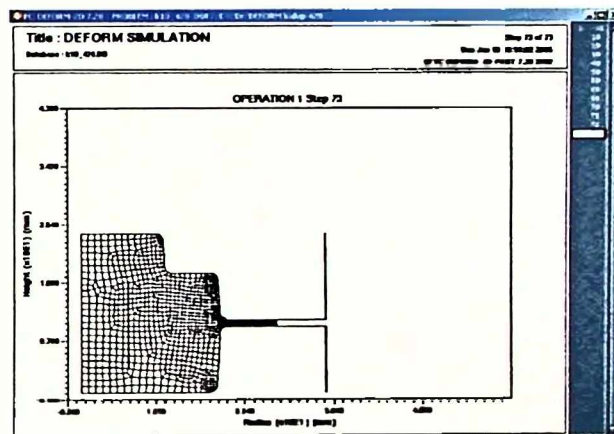
Slika P.4.7. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 7 plana eksperimenta



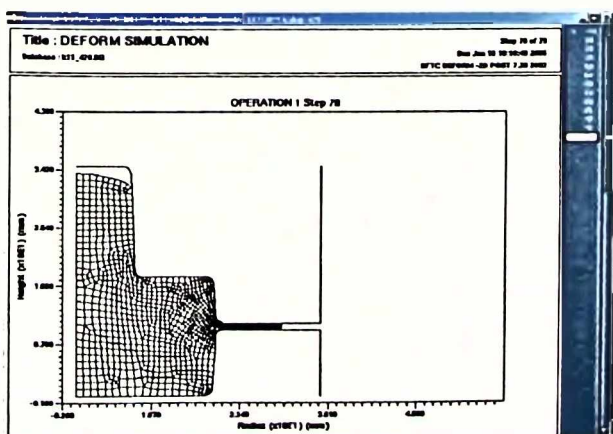
Slika P.4.8. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 8 plana eksperimenta



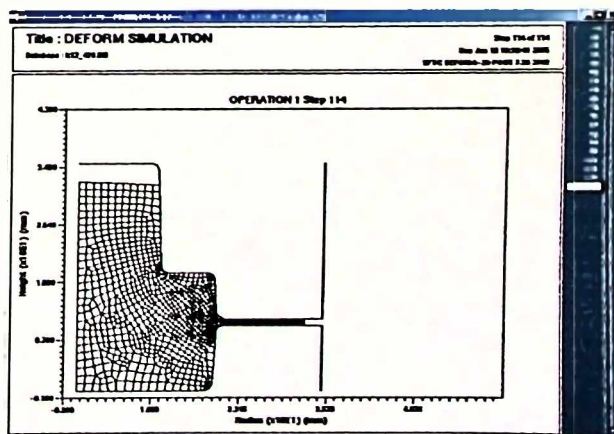
Slika P.4.9. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 9 plana eksperimenta



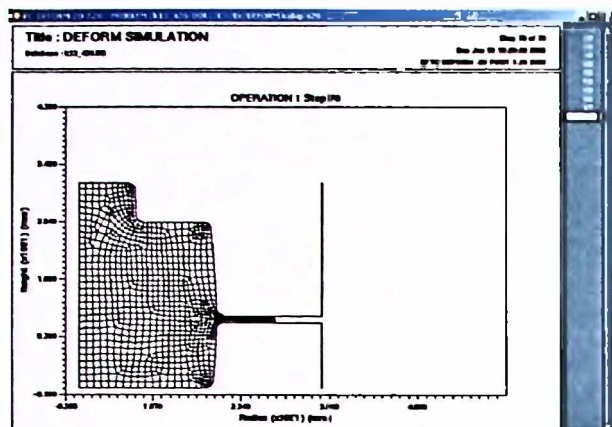
Slika P.4.10. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 10 plana eksperimenta



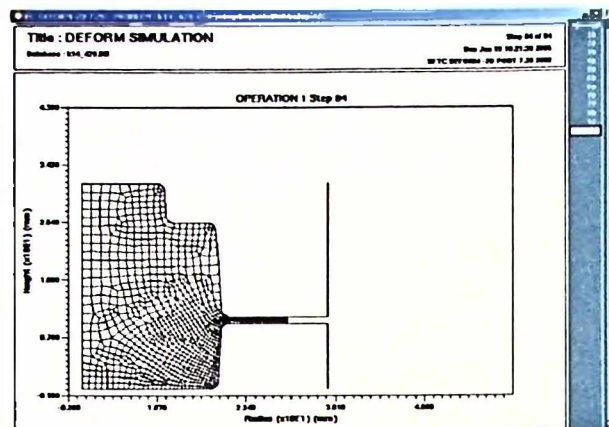
Slika P.4.11. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 11 plana eksperimenta



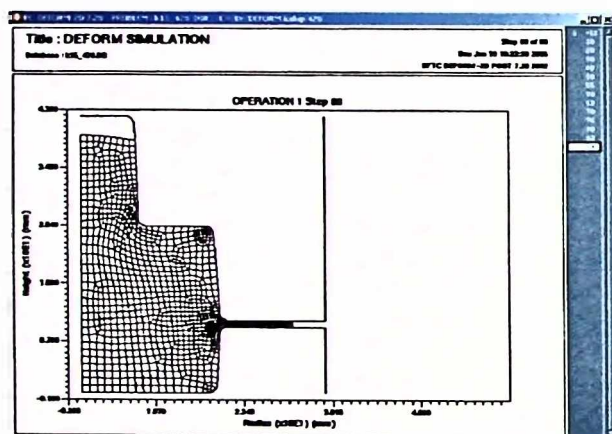
Slika P.4.12. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 12 plana eksperimenta



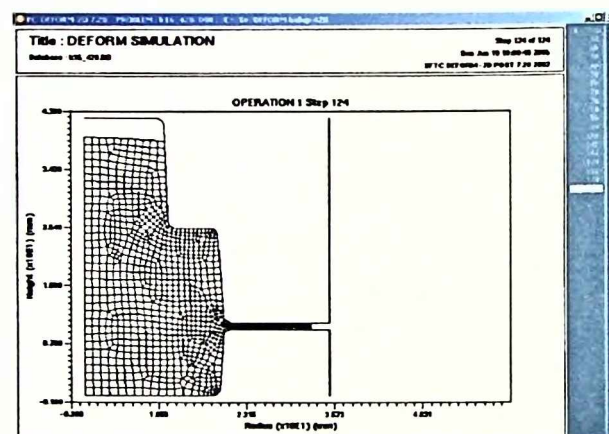
Slika P.4.13. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 13 plana eksperimenta



Slika P.4.14. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 14 plana eksperimenta



Slika P.4.15. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 15 plana eksperimenta



Slika P.4.16. Mreža konačnih elemenata na kraju procesa u tački 16 plana eksperimenta

Tabela P.5.1. Parametar β_1 modela (7.14) efektivne logaritamske deformacije φ_e

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-0.8601	-0.8505	-0.8042	-0.7339	-0.6608	-0.5966	-0.5481	-0.5187	-0.4929	-0.4536	-0.3890	-0.3310	-0.2938	-0.2673	-0.2500	-0.2446	-0.2439	-0.2572	-0.2780	-0.2750	-0.2070
2	-0.7391	-0.7221	-0.6551	-0.5942	-0.5371	-0.4711	-0.4143	-0.4192	-0.4420	-0.4016	-0.3459	-0.2674	-0.1754	-0.1150	-0.1089	-0.1477	-0.1620	-0.1464	-0.1522	-0.1079	-0.0548
3	-0.5286	-0.4922	-0.4256	-0.3667	-0.3132	-0.2515	-0.1794	-0.1766	-0.2092	-0.1906	-0.1240	-0.0172	0.0643	0.1015	0.0468	-0.0171	-0.0784	-0.1468	-0.1925	-0.1605	-0.1088
4	-0.4207	-0.3964	-0.3289	-0.2728	-0.2246	-0.1703	-0.0875	-0.0919	-0.1128	-0.0863	-0.0251	0.0789	0.1404	0.1372	0.0975	0.0436	-0.0295	-0.0980	-0.0978	-0.1522	-0.2207
5	-0.3656	-0.3469	-0.2924	-0.2441	-0.2023	-0.1626	-0.0811	-0.0927	-0.1152	-0.1004	-0.0582	0.0221	0.0543	0.0078	-0.0568	-0.1037	-0.1090	-0.0587	0.0875	0.1819	-0.0594
6	-0.3529	-0.3406	-0.3027	-0.2739	-0.2482	-0.2244	-0.1386	-0.1281	-0.1666	-0.1479	-0.0964	-0.0393	-0.0307	-0.0367	-0.0283	-0.0341	-0.0453	-0.0126	0.1473	0.2952	0.0366
7	-0.3212	-0.3082	-0.2740	-0.2463	-0.2281	-0.2192	-0.1423	-0.1570	-0.1994	-0.1890	-0.1291	-0.0754	-0.0365	0.0239	0.0459	0.0087	-0.0095	0.0712	0.3206	0.4997	0.1343
8	-0.3275	-0.3103	-0.2758	-0.2408	-0.2120	-0.2062	-0.1431	-0.1701	-0.1977	-0.1661	-0.0837	-0.0262	0.0747	0.1749	0.1887	0.1475	0.1008	0.1927	0.4678	0.5815	0.3588
9	-0.2840	-0.2686	-0.2382	-0.2113	-0.2050	-0.2045	-0.1361	-0.1543	-0.1657	-0.1218	-0.0373	0.0390	0.1394	0.1968	0.2072	0.1511	0.1492	0.2801	0.4937	0.6912	0.4477
10	-0.2128	-0.2089	-0.1788	-0.1466	-0.1410	-0.1382	-0.0723	-0.0580	-0.0249	0.0645	0.1310	0.2057	0.2923	0.3370	0.3051	0.3043	0.3590	0.4939	0.5911	0.8332	0.5547
11	-0.1142	-0.1103	-0.0829	-0.0548	-0.0902	0.0219	0.0962	0.1518	0.2409	0.2853	0.2642	0.2983	0.3710	0.3965	0.5286	0.7238	0.7978	0.8923	1.1553	1.0755	0.5371
12	-0.1142	-0.0863	-0.0281	0.0750	0.2206	0.3907	0.6437	0.8333	1.1203	1.9243	2.5162	2.2116	2.1644	1.7243	0.3943	-0.1057	-0.2220	-0.2599	-0.3029	-0.2613	-0.2751
13	0.0510	0.0794	0.1344	0.2520	0.4477	0.5817	0.6831	0.7893	1.3227	2.2160	2.5400	2.4515	2.2405	1.8427	1.2464	0.4973	-0.0456	-0.4984	-0.8666	-1.1867	-1.5907
14	0.1385	0.1718	0.2352	0.4238	0.6560	0.7436	0.7540	0.8772	1.3004	2.1628	2.6650	2.4433	2.2666	2.2459	1.8758	1.4666	0.9365	0.3226	-0.2033	-0.6218	-1.1206
15	0.4016	0.4301	0.4850	0.6519	0.9268	1.0539	1.0354	1.1374	1.4475	2.0457	2.3419	2.1188	1.9311	2.0861	2.1217	1.8834	1.3384	0.7591	0.2001	-0.2227	-0.6027
16	0.8069	0.8156	0.8701	0.9903	1.1700	1.3023	1.3116	1.3979	1.5554	1.9332	2.2417	1.9500	1.3592	1.5305	1.9686	2.0320	1.6345	1.1983	0.8356	0.5776	0.2603
17	0.7664	0.8402	0.9792	1.1566	1.2774	1.3649	1.4509	1.5503	1.6922	1.8308	1.8518	1.7756	1.4630	1.3327	1.5029	1.8108	1.7489	1.4884	1.2155	0.9745	0.6815
18	0.8491	0.9610	1.1214	1.2758	1.4054	1.4859	1.5737	1.5701	1.6562	1.7354	1.7140	1.5693	1.3680	1.2908	1.4216	1.6208	1.6426	1.5160	1.2551	0.9927	0.6601
19	0.8486	0.9800	1.1518	1.3029	1.4552	1.5733	1.6319	1.5235	1.5258	1.5381	1.6313	1.5777	1.4718	1.3711	1.4812	1.5405	1.5147	1.4135	1.1931	0.8839	0.4691
20	0.7495	0.8707	1.0266	1.1463	1.2775	1.3929	1.4847	1.4150	1.3064	1.3547	1.3845	1.4454	1.5015	1.5331	1.6870	1.6773	1.6430	1.2668	1.0320	0.8423	0.5851
21	0.7448	0.8202	0.9497	1.0355	1.1081	1.2034	1.3119	1.3267	1.3073	1.3116	1.3217	1.2915	1.2272	1.3532	1.6068	2.0127	2.5877	2.7681	2.0195	0.9130	0.2416
22	1.0179	1.0826	1.1526	1.1833	1.2608	1.3327	1.4254	1.4286	1.3677	1.3127	1.2363	1.1187	1.0082	1.0331	0.9850	0.8953	0.7357	0.9208	2.1980	2.2902	0.2910
23	1.0179	1.1041	1.1801	1.2699	1.4112	1.5643	1.5256	1.5248	1.5250	1.7755	2.0292	2.1706	3.1024	0.4229	0.2173	1.5274	3.1011	3.7118	4.1200	3.5673	3.8829
24	1.2427	1.3292	1.3760	1.4212	1.5563	1.6239	1.5721	1.5650	1.4984	1.4852	1.5265	1.9871	2.5866	3.7458	3.4545	3.3390	3.4460	3.6116	3.8042	3.9510	4.0714
25	1.4467	1.5426	1.5896	1.6562	1.7163	1.7330	1.6490	1.6152	1.5167	1.4724	1.5523	2.0707	2.5148	2.4256	3.2683	3.4251	3.7735	3.6756	2.7342	2.8685	4.4610
26	1.4467	1.5226	1.5845	1.5921	1.6551	1.6769	1.6747	1.6120	1.5354	1.4849	1.3955	1.2748	1.1729	1.1711	1.4267	1.7533	2.0018	2.2060	1.5571	1.6859	1.0899
27	1.6871	1.7577	1.8120	1.8406	1.8563	1.8672	1.8739	1.8392	1.7271	1.6180	1.5411	1.4724	1.3600	1.3417	1.4387	1.7184	1.9688	2.0898	1.8694	1.5519	0.9517
28	1.8430	1.8799	1.9132	1.9292	1.9126	1.9177	1.9354	1.9475	1.8887	1.7713	1.6685	1.6032	1.5616	1.4778	1.2753	1.0921	0.9680	0.8984	0.9183	0.9716	0.9493
29	1.9865	1.9828	1.9927	1.9972	1.9519	1.9530	1.9687	1.9937	1.9858	1.8729	1.7420	1.6275	1.5848	1.5326	1.3342	1.0802	0.9139	0.8274	0.8041	0.7719	0.7159
30	1.8070	1.7817	1.7902	1.8093	1.8018	1.8512	1.9063	1.9615	1.9640	1.8783	1.7893	1.6878	1.6176	1.5739	1.3910	1.1929	1.0175	0.8919	0.7917	0.6853	0.5763
31	1.6831	1.6495	1.6303	1.6191	1.5892	1.5903	1.5974	1.6286	1.6125	1.6245	1.6669	1.6942	1.6893	1.6275	1.4984	1.3151	1.1156	0.9441	0.7648	0.5827	0.4051
32	1.6059	1.5530	1.5109	1.4776	1.4116	1.3614	1.2926	1.2734	1.3026	1.3997	1.5353	1.6195	1.5911	1.5000	1.4191	1.3689	1.2157	1.0468	0.8139	0.5457	0.2686
33	1.3934	1.3533	1.3252	1.3081	1.2243	1.1320	1.0264	0.9844	1.0342	1.1417	1.2497	1.2678	1.3085	1.3641	1.4046	1.4807	1.4230	1.2298	0.9939	0.6783	0.3176
34	0.9091	0.8950	0.9002	0.9449	0.9385	0.8919	0.8240	0.8062	0.8390	0.9021	0.9256	0.9302	1.0055	1.1246	1.2357	1.3506	1.4508	1.3403	1.4103	1.2675	0.9649
35	0.5966	0.5941	0.6110	0.6833	0.7357	0.7203	0.6680	0.6517	0.6520	0.6628	0.6150	0.5825	0.5682	0.5582	0.5074	0.4702	0.6299	1.0077	1.5034	1.5596	1.3429
36	0.4655	0.4398	0.4444	0.5041	0.5770	0.5527	0.5176	0.5015	0.4763	0.4426	0.4038	0.3311	0.2303	0.0876	0.0055	0.0138	0.0913	0.2590	0.5929	1.2119	1.6400

Tabela P.5.2. Parametar β_2 modela (7.14) efektivne logaritamске deformacije φ_e

$i \rightarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	2.5090	2.4721	2.3162	2.0872	1.8477	1.6430	1.4839	1.2976	1.0678	0.8614	0.6955	0.5692	0.4639	0.3604	0.2477	0.1301	0.0255	0.0149	0.1636	0.3590	0.4561
2	2.4037	2.3383	2.0980	1.8779	1.6676	1.4709	1.2887	1.0467	0.8780	0.6343	0.3651	0.0990	-0.1800	-0.4239	-0.4940	-0.3770	-0.0666	0.1563	0.4360	0.4711	0.4097
3	2.0932	1.9794	1.7108	1.4646	1.2384	1.0285	0.7118	0.4685	0.2338	-0.0368	-0.3288	-0.6642	-0.9467	-1.1424	-1.0591	-0.7076	-0.2903	0.0388	0.2084	0.0585	-0.3480
4	1.8467	1.7509	1.4765	1.2336	1.0186	0.8177	0.4345	0.1820	-0.1001	-0.4072	-0.6984	-1.0673	-1.3415	-1.4212	-1.2697	-0.9200	-0.4534	-0.0417	0.0118	-0.1070	-0.6382
5	1.5809	1.5088	1.2784	1.0620	0.8697	0.7114	0.3047	0.0696	-0.2036	-0.4635	-0.6837	-0.9897	-1.1515	-1.0791	-0.7677	-0.4096	-0.1871	-0.1611	-0.5711	-0.8857	-1.0220
6	1.3621	1.3052	1.1192	0.9510	0.8024	0.7347	0.2930	-0.0216	-0.2353	-0.4893	-0.7341	-0.9884	-1.1167	-1.0702	-0.8855	-0.5700	-0.3375	-0.3092	-0.7389	-1.4216	-1.6252
7	0.9007	0.8477	0.6902	0.5486	0.4433	0.4170	0.0975	-0.1348	-0.3494	-0.5902	-0.8648	-1.1119	-1.2720	-1.3491	-1.1427	-0.7414	-0.4419	-0.4287	-1.1058	-1.5404	-1.9570
8	0.4852	0.4355	0.2821	0.1287	0.0165	0.0512	-0.1791	-0.3149	-0.5173	-0.7675	-1.1143	-1.3692	-1.6560	-1.7922	-1.4772	-1.0449	-0.6431	-0.7224	-1.2877	-1.4635	-2.2305
9	0.1541	0.1049	-0.0556	-0.2040	-0.2842	-0.2489	-0.4482	-0.5546	-0.7183	-0.9351	-1.2500	-1.4793	-1.7662	-1.8802	-1.6011	-1.0843	-0.7309	-0.6988	-1.1501	-1.4648	-2.0190
10	-0.1429	-0.1771	-0.3429	-0.5137	-0.5969	-0.5468	-0.7077	-0.8779	-1.0455	-1.2742	-1.4314	-1.5992	-1.7344	-1.8001	-1.6355	-1.3629	-1.0849	-1.1210	-1.1713	-1.5121	-1.9051
11	-0.6674	-0.7446	-0.9449	-1.1480	-1.0565	-1.2668	-1.3897	-1.4723	-1.5933	-1.6412	-1.6338	-1.7330	-1.7092	-1.5937	-1.5282	-1.5611	-1.4610	-1.3779	-1.7452	-1.9830	-1.5699
12	-0.6674	-0.9019	-1.1738	-1.3108	-1.4324	-1.7029	-2.1674	-2.1485	-1.6698	-2.5095	-3.6162	-2.9706	-3.6148	-3.5170	-1.0684	0.4506	0.9358	1.1051	1.5706	1.7969	1.5961
13	-1.6554	-1.9164	-2.1442	-1.9748	-1.8465	-1.9687	-2.1311	-1.5486	-1.7530	-3.1662	-3.1466	-2.6011	-2.0380	-1.2833	-0.0903	1.1479	1.9802	2.3203	2.0113	1.2141	0.7578
14	-2.5174	-2.7176	-2.7931	-2.6237	-2.4524	-2.3179	-2.2087	-1.7718	-1.4366	-2.4634	-3.2002	-2.4742	-1.9913	-1.8613	-0.9673	-0.0968	0.2252	0.3511	0.0335	-0.6661	-1.0392
15	-3.2889	-3.3084	-3.3171	-2.9640	-2.7732	-2.6101	-2.3314	-1.9991	-1.6217	-1.6919	-1.5068	-0.7458	-0.7322	-1.4808	-1.9139	-1.6225	-0.9684	-0.8578	-0.9026	-1.4711	-2.1512
16	-3.2833	-3.1423	-3.0507	-2.6999	-2.4498	-2.3069	-2.0761	-1.9662	-1.7823	-1.9655	-1.7168	-0.5824	0.8626	0.0927	-1.3735	-2.0844	-1.7156	-1.5753	-1.9457	-2.8113	-3.5242
17	-1.9085	-1.9845	-2.1562	-2.0128	-1.7067	-1.4931	-1.4302	-1.4022	-1.5471	-1.6619	-1.3273	-0.8197	0.1970	0.3444	-0.2874	-1.2908	-1.6892	-1.7608	-2.0486	-2.5591	-3.0463
18	-0.6453	-0.7875	-1.0167	-0.9617	-0.9145	-0.9147	-0.9704	-0.8175	-0.9768	-1.1800	-1.0880	-0.7301	0.0056	0.4602	-0.1687	-0.9542	-1.2725	-1.3516	-1.4237	-1.6201	-1.6824
19	0.8003	0.6164	0.3606	0.3072	0.0425	-0.2066	-0.3279	-0.0669	-0.1278	-0.3296	-0.6637	-0.7470	-0.5440	-0.0173	0.0316	-0.6391	-0.9706	-0.9918	-0.8887	-0.6945	-0.1747
20	1.8146	1.6747	1.4797	1.3379	1.0275	0.7822	0.6089	0.7586	0.8450	0.5389	0.1320	-0.3741	-0.5932	-0.4190	-0.4299	-0.2018	-0.9210	-0.5754	-0.5363	-0.7250	-0.7247
21	2.1847	2.1749	2.0195	1.9134	1.7573	1.5312	1.2668	1.1392	1.0163	0.8134	0.5715	0.4152	0.4191	0.2997	0.1399	-0.2845	-2.0876	-4.2880	-3.5519	-1.4229	-0.0655
22	1.5329	1.5778	1.5890	1.5638	1.4082	1.2791	1.0931	0.9961	0.9995	0.9578	0.9828	1.0540	1.2339	1.2429	1.8762	2.6952	3.6617	3.5060	0.5306	-2.3887	-0.8363
23	1.5329	1.5863	1.4986	1.3282	1.0472	0.6152	0.6088	0.4627	0.4458	-0.0123	0.2748	0.1241	-3.8287	4.2562	3.2117	-1.2005	-2.8776	-1.7935	-1.9312	-0.7015	-1.9940
24	1.0272	1.0549	1.0383	0.9604	0.6994	0.4896	0.5125	0.4523	0.4999	0.4591	0.8072	0.7952	-0.3738	-3.4353	-2.3397	-1.5748	-1.6383	-1.9134	-2.1303	-2.1261	-2.0450
25	0.6340	0.5923	0.5160	0.3600	0.2594	0.1857	0.2968	0.3576	0.5434	0.5797	0.3567	-1.7335	-3.7531	-5.8853	-7.2383	-5.7280	-5.2874	-5.5097	-2.2917	-0.4103	-1.6478
26	0.6340	0.5950	0.5630	0.5601	0.3952	0.3560	0.3774	0.4643	0.5588	0.5599	0.6985	0.9394	1.0153	0.9337	-0.1467	-0.5385	-2.9065	-4.1031	-3.3975	-3.2410	0.7147
27	0.2432	0.1414	0.0402	-0.0777	-0.2126	-0.2909	-0.3186	-0.2960	-0.1411	0.0044	0.3322	0.5924	0.5924	0.5580	0.2456	-0.6650	-1.6456	-2.2939	-1.8821	-1.9730	-1.3599
28	-0.8072	-0.8354	-0.8724	-0.9130	-0.8829	-0.8629	-0.8434	-0.8550	-0.7621	-0.5710	-0.3358	-0.2175	-0.1178	0.0245	0.4159	0.6707	0.7228	0.6567	0.4617	0.0565	-0.1796
29	-2.1485	-2.0410	-1.9556	-1.8748	-1.6303	-1.5177	-1.3982	-1.3261	-1.2354	-0.9820	-0.6622	-0.3941	-0.2943	-0.2735	0.1320	0.5874	0.7779	0.7953	0.6920	0.6039	0.5764
30	-2.2199	-2.0772	-2.0061	-1.9596	-1.8061	-1.8064	-1.7637	-1.7236	-1.6177	-1.3610	-1.0229	-0.6504	-0.4453	-0.4487	-0.1187	0.2951	0.5686	0.6651	0.7007	0.7646	0.8478
31	-2.3233	-2.1726	-2.0406	-1.9143	-1.7704	-1.6693	-1.5261	-1.4398	-1.2782	-1.1460	-1.0427	-0.8956	-0.7540	-0.6842	-0.4203	-0.0609	0.3605	0.5514	0.7087	0.8860	1.0704
32	-2.3063	-2.1560	-2.0226	-1.9050	-1.7382	-1.5621	-1.3033	-1.1617	-0.9755	-0.9331	-0.9736	-0.8795	-0.6695	-0.3405	-0.1466	-0.0669	0.2786	0.4689	0.7476	1.1335	1.5572
33	-2.0204	-1.9109	-1.8153	-1.7460	-1.5574	-1.3431	-1.0580	-0.8631	-0.7085	-0.7035	-0.7138	-0.5120	-0.3066	-0.1172	-0.0546	-0.1281	-0.0511	0.4122	0.6710	1.0702	1.6092
34	-1.2590	-1.1889	-1.1473	-1.1845	-1.1390	-1.0401	-0.8521	-0.7216	-0.6140	-0.6039	-0.5481	-0.2306	-0.0269	0.0705	0.1192	0.1376	0.0284	0.4914	0.2896	0.1874	0.5577
35	-0.9523	-0.9110	-0.8809	-0.9483	-0.9632	-0.9169	-0.7677	-0.6569	-0.5203	-0.4383	-0.2395	0.1062	0.4064	0.6986	1.048	1.6128	1.6985	1.1515	0.3691	-0.0031	0.4524
36	-1.0707	-0.9794	-0.8711	-0.8843	-0.9698	-0.8584	-0.7425	-0.6563	-0.4824	-0.2905	-0.1434	0.0322	0.3320	0.7820	1.0170	0.9535	0.7967	0.7085	0.8953	0.7405	0.6633

Tabela P.5.3. Parametar β_3 modela (7.14) efektivne logaritamске deformacije φ_e

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	4.7138	4.7138	4.4408	4.0300	3.5978	3.2136	2.9172	2.6902	2.4776	2.2403	1.9391	1.6758	1.4882	1.3624	1.2778	1.2429	1.2705	1.4852	1.8770	2.1478	1.8997
2	4.9058	4.7752	4.3422	3.9482	3.5738	3.2055	2.8301	2.6363	2.5091	2.0714	1.7464	1.3671	0.9307	0.5755	0.5265	0.7594	1.1293	1.2400	1.2075	0.7250	0.1285
3	4.1528	3.9098	3.4497	3.0316	2.6474	2.2794	1.9050	1.6591	1.4122	0.9872	0.5221	-0.0915	-0.5374	-0.7677	-0.5089	0.0576	0.5865	0.8237	0.7436	0.0950	-0.6591
4	3.2210	3.0191	2.5503	2.1192	1.7333	1.3701	0.8702	0.5866	0.2683	-0.1291	-0.5498	-1.1836	-1.5556	-1.5134	-1.0899	-0.4421	0.1787	0.5585	0.3355	-0.1786	-0.7155
5	2.1082	1.9513	1.5255	1.1329	0.7860	0.4519	-0.1053	-0.3312	-0.5843	-0.8594	-1.2111	-1.7304	-1.8738	-1.5096	-0.8401	-0.2026	0.2469	0.2869	-0.6103	-1.6123	-1.1076
6	1.2373	1.1247	0.7893	0.4785	0.1966	-0.1051	-0.7088	-1.0737	-1.2113	-1.4405	-1.8286	-2.2164	-2.2444	-1.9410	-1.5029	-0.9723	-0.4658	-0.4137	-0.9764	-2.1844	-1.0510
7	0.0343	-0.0474	-0.2961	-0.5275	-0.7352	-0.9106	-1.1511	-1.7026	-1.8096	-2.0532	-2.5154	-2.8677	-2.9321	-2.8531	-2.3442	-1.5529	-1.0395	-1.1034	-1.9597	-2.4457	-0.4783
8	-1.0458	-1.1070	-1.2986	-1.4917	-1.6430	-1.7155	-2.2189	-2.2833	-2.3846	-2.6775	-3.1701	-3.4693	-3.6936	-3.7167	-3.0856	-2.2229	-1.4546	-1.4976	-2.2867	-2.0907	-0.6094
9	-1.8615	-1.8990	-2.0444	-2.1675	-2.1863	-2.2347	-2.6976	-2.7864	-2.9284	-3.2675	-3.6993	-3.9486	-4.2470	-4.1712	-3.4362	-2.3701	-1.6868	-1.5172	-1.6571	-1.7697	-0.6867
10	-2.3752	-2.3844	-2.5396	-2.7017	-2.7278	-2.7546	-3.1342	-3.2830	-3.4295	-3.7305	-3.8787	-3.9475	-3.9985	-3.9138	-3.4527	-2.7396	-2.1803	-1.8117	-1.3268	-1.8180	-0.9608
11	-3.1560	-3.2107	-3.3828	-3.5524	-3.3258	-3.8005	-3.9880	-3.9536	-3.9580	-3.8016	-3.6003	-3.5845	-3.4822	-3.1498	-2.7650	-2.6813	-1.9843	-1.6166	-1.9569	-1.5669	-0.4534
12	-3.1560	-3.3528	-3.5525	-3.6723	-3.8871	-4.2071	-4.6521	-4.2560	-3.1945	-4.7344	-6.4420	-4.9314	-5.5828	-4.4654	0.8119	3.6016	3.9357	3.4453	3.1364	2.3994	1.9352
13	-4.1649	-4.4019	-4.5681	-4.4142	-4.3123	-4.4458	-4.2761	-3.0866	-3.5109	-6.1662	-6.1782	-5.2595	-4.6225	-3.1248	-0.6971	1.9161	3.1636	3.6251	3.3064	2.6695	2.5875
14	-4.8536	-5.0666	-5.1399	-5.0925	-5.0495	-4.9594	-4.5514	-3.8883	-5.8883	-6.3520	-5.8883	-5.0009	-5.0425	-6.3491	-6.7683	-7.8130	-5.8691	-5.0068	-4.7478	-2.9078	-1.1763
15	-6.2840	-6.3684	-6.4552	-6.3584	-6.4200	-6.3520	-5.8883	-6.8823	-6.0358	-5.5905	-5.5573	-4.5339	-2.4382	-1.0762	-1.2958	-2.4645	-3.0341	-3.1500	-3.6030	-4.4987	-5.2981
16	-8.3252	-8.1658	-8.0916	-7.9472	-7.7510	-7.4237	-6.8823	-6.0358	-5.5905	-5.5573	-4.5339	-2.4382	-1.0762	-1.2958	-2.4645	-3.0341	-3.1500	-3.6030	-4.4987	-5.2981	-5.2981
17	-7.9209	-8.0840	-8.3405	-8.4758	-8.0370	-7.4156	-6.9949	-6.3942	-5.8163	-5.7335	-4.7539	-2.4337	-3.5068	-2.2122	-1.4611	-1.2099	-1.4895	-1.9592	-2.3062	-2.7557	-3.3562
18	-7.9666	-8.1558	-8.4125	-8.5255	-8.2250	-7.6513	-7.2148	-6.4062	-5.3588	-4.7539	-4.2437	-3.1601	-2.7358	-2.1798	-1.8538	-1.4404	-1.2235	-1.3957	-1.7232	-1.8377	-1.2821
19	-7.8249	-7.9850	-8.1586	-8.1566	-7.8296	-7.4111	-6.8953	-5.8825	-4.7516	-3.3861	-2.1042	-2.0442	-1.7670	-1.6846	-2.3846	-2.5344	-2.0315	-0.6356	-0.7464	-1.2432	-1.3576
20	-7.8059	-7.7646	-7.6902	-7.2703	-6.5962	-5.9848	-5.3183	-4.4119	-3.3861	-2.6580	-2.1042	-2.0442	-1.7670	-1.6846	-2.3846	-2.5344	-2.0315	-0.6356	-0.7464	-1.2432	-1.3576
21	-7.3998	-7.1414	-6.9449	-6.3163	-5.3618	-4.6455	-3.8985	-3.1713	-2.4414	-1.9320	-1.4913	-0.9918	-0.4052	-0.5762	-0.9255	-2.0537	-5.0046	-6.6193	-4.2016	-1.2516	-0.2067
22	-7.1192	-6.8600	-6.5487	-5.7971	-4.8542	-4.0615	-3.3898	-2.6907	-1.8889	-1.2999	-0.5729	0.3145	1.0376	1.1583	1.5959	2.3062	3.2986	3.3734	-0.3342	-2.0223	1.5113
23	-7.1192	-6.7327	-6.1018	-4.7492	-3.8769	-3.3566	-2.4958	-2.0659	-1.7569	-1.3507	-1.4935	-3.8705	-6.2524	-11.0660	-9.2415	-7.9942	-8.6816	-9.7598	-9.5645	-5.8475	-9.2580
24	-7.0433	-6.7135	-6.0869	-4.7957	-3.8567	-3.0748	-2.2010	-1.9329	-1.3507	-1.1779	-1.4935	-3.8705	-6.2524	-11.0660	-9.2415	-7.9942	-8.6816	-9.7598	-9.5645	-5.8475	-9.2580
25	-6.7423	-6.5490	-6.0969	-4.9548	-3.9571	-3.1269	-2.2176	-1.9734	-1.4375	-0.9231	-1.0126	-3.7134	-7.0184	-8.6268	-13.8460	-15.9150	-16.5200	-15.3570	-8.2340	-5.1765	-8.6580
26	-6.7423	-6.6298	-6.4591	-5.8824	-5.1060	-4.2504	-3.3869	-2.5755	-1.8327	-1.3534	-0.9282	-0.2674	0.4067	0.5739	-0.8454	-2.7703	-4.7515	-6.5617	-4.4580	-5.1933	-0.8612
27	-5.6891	-5.6621	-5.6019	-5.4106	-4.8274	-4.1896	-3.5861	-2.9259	-2.3631	-1.8562	-1.5143	-1.2434	-0.9579	-1.0584	-1.3431	-2.9325	-4.6008	-5.7762	-5.3053	-4.6342	-2.8144
28	-5.4147	-5.2676	-5.1220	-4.9157	-4.3713	-3.8864	-3.4137	-3.0337	-2.7472	-2.3560	-2.0008	-1.8175	-1.8082	-1.7227	-0.9864	-0.5817	-0.5169	-0.6756	-1.1247	-1.9359	-2.5391
29	-5.4780	-5.2215	-5.0008	-4.7652	-4.2098	-3.8191	-3.4245	-3.1222	-2.9435	-2.5515	-2.0706	-1.7257	-1.7368	-1.8277	-1.2363	-0.5593	-0.2838	-0.2798	-0.4517	-0.7038	-0.8729
30	-4.1058	-3.8527	-3.7190	-3.6264	-3.3142	-3.2687	-3.1894	-3.1601	-3.0705	-2.6659	-2.2196	-1.8365	-1.6610	-1.8296	-1.3445	-0.8473	-0.5098	-0.3717	-0.2999	-0.1949	-0.0772
31	-3.4081	-3.1892	-3.0268	-2.9032	-2.6411	-2.5308	-2.3818	-2.3349	-2.1600	-2.0377	-2.0237	-1.9831	-2.0078	-1.9719	-1.6039	-1.1467	-0.6581	-0.3961	-0.1186	0.1825	0.4927
32	-3.2365	-2.9777	-2.7578	-2.5745	-2.2022	-1.9243	-1.5298	-1.3407	-1.2994	-1.4707	-1.7896	-1.8737	-1.6472	-1.2250	-0.1164	0.9978	-0.6267	-0.4390	-0.0665	0.4952	1.1049
33	-2.9017	-2.6860	-2.4918	-2.3301	-1.9140	-1.4925	-0.9699	-0.6910	-0.7171	-0.9807	-1.2280	-1.1012	-0.9835	-0.9100	-1.0005	-1.2691	-1.1042	-0.6661	-0.2191	0.4615	1.3209
34	-1.3914	-1.3213	-1.2685	-1.3407	-1.2791	-1.0510	-0.6837	-0.4791	-0.4418	-0.5698	-0.5203	-0.2988	-0.2299	-0.3526	-0.5665	-0.7275	-0.8653	-0.6208	-1.2083	-1.0594	-0.2425
35	-0.3917	-0.3811	-0.4028	-0.6211	-0.8486	-0.7653	-0.4676	-0.2428	-0.0487	0.0139	0.3625	0.7026	0.9614	1.2006	1.5060	1.9642	1.8533	1.5446	-1.0420	-1.0349	-0.0405
36	-0.1349	-0.0354	-0.0305	-0.2165	-0.5154	-0.4698	-0.2565	-0.0276	0.2593	0.5748	0.8781	1.3570	1.9196	2.3818	2.4534	2.1953	1.6281	0.9354	0.1892	-0.7207	-0.8208

Tabela P.5.4. Parametar β_4 modela (7.14) efektivne logaritamske deformacije φ_e

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.1180	0.1325	0.1376	0.1025	0.0300	-0.0753	-0.1869	-0.2000	-0.1543	-0.1301	-0.1450	-0.1589	-0.1356	-0.0814	0.0000	0.1104	0.2252	0.3083	0.3658	0.3918	0.3459
2	0.1351	0.1431	0.1378	0.1325	0.1280	-0.0059	-0.1205	-0.0402	0.0383	0.1250	0.1670	0.1942	0.2313	0.3067	0.3868	0.4579	0.4357	0.4184	0.3927	0.3644	0.3412
3	0.1314	0.1333	0.1338	0.1354	0.1332	0.0041	-0.0837	-0.0086	0.1210	0.2284	0.2658	0.2892	0.3395	0.4167	0.5035	0.4949	0.5133	0.5318	0.5339	0.5149	0.5713
4	0.2088	0.2205	0.2204	0.2246	0.2262	0.1086	0.0342	0.1253	0.2574	0.3444	0.3782	0.4020	0.4538	0.5176	0.5254	0.4902	0.4700	0.4181	0.3888	0.4743	0.7860
5	0.2772	0.2865	0.2956	0.3050	0.3117	0.2279	0.1738	0.2675	0.3905	0.4683	0.5036	0.5239	0.5382	0.5575	0.5220	0.4924	0.4473	0.3748	0.3204	0.3158	0.8261
6	0.3562	0.3629	0.3771	0.3956	0.4091	0.3807	0.3600	0.4481	0.5639	0.6333	0.6626	0.6608	0.6527	0.5804	0.4582	0.4034	0.3712	0.3643	0.3282	0.4070	1.0330
7	0.4650	0.4654	0.4719	0.4819	0.4973	0.4845	0.4986	0.5863	0.7065	0.7870	0.8049	0.7627	0.6764	0.5328	0.3731	0.3164	0.2896	0.2241	0.1774	0.1594	1.1107
8	0.6217	0.6071	0.6073	0.6077	0.6108	0.5796	0.6180	0.6881	0.7800	0.8284	0.8091	0.7480	0.6358	0.4624	0.2817	0.2166	0.1746	0.1393	0.0289	0.0089	0.9790
9	0.6588	0.6379	0.6387	0.6365	0.6379	0.6689	0.7093	0.7647	0.8340	0.8446	0.7836	0.6787	0.5732	0.4673	0.3343	0.1963	0.0823	-0.0472	-0.0962	-0.0772	0.8277
10	0.6158	0.6022	0.6092	0.6168	0.6592	0.6876	0.7118	0.7348	0.7333	0.6776	0.6169	0.5436	0.4159	0.3357	0.2933	0.1684	-0.0127	-0.1489	-0.1488	-0.0785	0.6448
11	0.6824	0.6854	0.7086	0.7338	0.7769	0.7788	0.7261	0.6414	0.5476	0.4871	0.5016	0.5149	0.3872	0.2725	0.0293	-0.2168	-0.2617	-0.2329	-0.0673	0.2206	0.9398
12	0.6824	0.6952	0.6613	0.5849	0.5338	0.4190	0.2856	-0.0132	-0.6112	-1.2249	-1.5783	-1.4359	-0.9819	-0.1422	0.6927	1.0674	1.4254	1.8550	2.1641	2.4616	2.8603
13	0.7830	0.8201	0.7838	0.5921	0.3534	0.2980	0.3143	-0.0076	-0.5226	-1.0044	-1.2982	-1.1317	-0.7943	-0.0400	0.6492	1.1639	1.9180	2.8681	3.9356	5.0511	6.1144
14	0.8942	0.9149	0.8148	0.5929	0.3582	0.3238	0.3966	0.1972	-0.2613	-0.6617	-0.8470	-0.7023	-0.5353	-0.2081	0.4046	0.8928	1.6246	2.6642	3.7939	4.9718	6.1287
15	0.9057	0.9019	0.8592	0.6626	0.4365	0.3754	0.4575	0.3249	-0.0238	-0.4908	-0.6643	-0.5180	-0.2675	-0.2041	0.0057	0.4950	1.2526	2.3253	3.4664	4.5850	5.7121
16	0.8565	0.8107	0.7335	0.6364	0.5347	0.4530	0.4582	0.3679	0.2041	-0.0415	-0.3280	-0.1827	-0.0263	-0.0693	0.0446	-0.0061	0.4276	1.1514	2.0265	2.8786	3.7524
17	0.8093	0.7664	0.6914	0.6240	0.5859	0.5100	0.4544	0.3546	0.2416	0.1731	0.0648	-0.0557	-0.0237	0.0930	0.0446	0.1287	0.3644	0.8304	1.5310	2.2314	2.9310
18	0.8389	0.7519	0.6406	0.6239	0.6226	0.5666	0.5168	0.4750	0.3567	0.3068	0.2896	0.3084	0.1295	-0.0137	0.0741	0.0826	0.3596	0.7175	1.2594	1.8876	2.3067
19	1.0600	0.9561	0.8176	0.7698	0.6721	0.6090	0.5739	0.5988	0.5290	0.5047	0.4328	0.4199	0.3090	0.1004	-0.1219	0.0826	0.3596	0.7175	1.2594	1.8876	2.3067
20	1.4613	1.3484	1.1800	1.0412	0.8950	0.8040	0.7157	0.7337	0.7798	0.6858	0.6246	0.5655	0.4211	0.0702	-0.2670	-0.3317	0.0195	0.5206	0.9449	1.3909	1.7276
21	1.6769	1.5792	1.4322	1.2846	1.1534	1.0796	0.9775	0.9258	0.8782	0.8298	0.7591	0.7101	0.6982	0.3782	-0.2211	-0.9572	-1.3205	-0.7751	0.1413	0.9617	1.6202
22	1.5678	1.4843	1.3970	1.3457	1.2669	1.2129	1.1086	1.0333	0.9724	0.9011	0.7953	0.7724	0.7510	0.6758	0.4391	0.1548	-0.0300	-0.4042	-1.0563	-0.9807	1.5678
23	1.5678	1.4551	1.3869	1.2620	1.1410	0.9988	0.8585	0.6826	0.3967	-0.0264	-0.5676	-0.8727	-0.9060	-0.1139	0.3093	0.0220	-1.4424	-1.8052	-1.8272	-1.5167	-1.0821
24	1.5262	1.4187	1.3918	1.3343	1.1855	1.0407	0.9185	0.7633	0.5637	0.4228	0.1939	-0.5768	-1.0643	-1.6362	-1.4772	-1.4404	-1.3709	-1.2811	-1.2038	-1.1584	-1.0851
25	1.4389	1.3778	1.3355	1.3329	1.3032	1.2625	1.1866	1.1303	0.9755	0.4950	0.3967	0.4406	0.6000	1.2212	0.3776	-0.0439	-1.3283	-1.3830	-1.2425	-1.1889	-1.5444
26	1.4389	1.3778	1.2086	1.2303	1.2445	1.2567	1.2272	1.1889	1.2083	1.2123	1.1311	0.8336	0.8466	0.8377	0.8855	0.9842	1.1968	1.3485	1.8177	1.1453	0.1803
27	1.2705	1.2288	1.2814	1.2985	1.3016	1.3163	1.2723	1.2220	1.2391	1.2536	1.2043	1.1008	0.9240	0.8340	0.7446	0.6956	0.6798	0.6348	0.3432	-0.1733	-0.4433
28	1.3118	1.2886	1.2814	1.2607	1.2680	1.3016	1.2644	1.2112	1.1854	1.1911	1.1405	1.0734	0.9612	0.8614	0.6911	0.5423	0.3853	0.2649	0.1628	0.0840	0.0475
29	1.2866	1.2714	1.2601	1.2607	1.2680	1.3016	1.2644	1.2112	1.1854	1.1911	1.1405	1.0734	0.9612	0.8614	0.6911	0.5423	0.3853	0.2649	0.1628	0.0840	0.0475
30	0.9500	0.9453	0.9446	0.9632	1.0115	1.1141	1.1337	1.1286	1.1526	1.1478	1.0931	1.0345	0.9658	0.8612	0.7042	0.5249	0.3669	0.2592	0.1754	0.1003	0.0376
31	0.7795	0.7815	0.7796	0.7718	0.8554	0.9514	0.9794	0.9990	1.0361	1.0255	0.9793	0.9440	0.9241	0.8297	0.6949	0.5252	0.3666	0.2800	0.2253	0.1736	0.1288
32	0.6024	0.6145	0.6186	0.6223	0.7018	0.7868	0.8206	0.8515	0.8520	0.8302	0.8037	0.7742	0.7733	0.7217	0.6404	0.5499	0.4565	0.3462	0.2539	0.1727	0.0950
33	0.5833	0.5865	0.5648	0.5429	0.6060	0.6790	0.6966	0.7024	0.6522	0.6212	0.6125	0.6803	0.6923	0.6991	0.7327	0.6664	0.5966	0.3890	0.2205	0.0929	-0.0160
34	0.7703	0.7468	0.6819	0.6045	0.6160	0.6450	0.6168	0.5789	0.5161	0.4928	0.5190	0.5556	0.5763	0.6032	0.6582	0.6751	0.6773	0.5561	0.2655	0.0703	-0.1784
35	0.9298	0.8890	0.8085	0.7100	0.6771	0.6571	0.5922	0.5283	0.4563	0.4265	0.4511	0.4640	0.4937	0.5336	0.5937	0.6492	0.6446	0.4973	0.2611	0.1400	-0.0843
36	1.0601	1.0177	0.9226	0.8363	0.8043	0.7831	0.6936	0.5785	0.4743	0.4088	0.3741	0.3754	0.3764	0.3689	0.3349	0.3123	0.3255	0.3333	0.3548	0.2332	0.2193

Tabela P.5.5. Parametar β_5 modela (7.14) efektivne logaritamske deformacije φ_e

$i \rightarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-0.0919	-0.0833	-0.0703	-0.0539	-0.0386	-0.0294	-0.0277	-0.0191	-0.0052	0.0044	0.0062	0.0100	0.0190	0.0304	0.0566	0.0968	0.1299	0.1312	0.1024	0.0563	-0.0054
2	-0.1880	-0.1760	-0.1546	-0.1349	-0.1156	-0.1015	-0.0962	-0.0607	-0.0201	0.0120	0.0265	0.0404	0.0546	0.0943	0.1256	0.1383	0.0963	0.0445	0.0241	0.0527	0.0963
3	-0.2690	-0.2573	-0.2321	-0.2081	-0.1854	-0.1690	-0.1598	-0.1282	-0.0672	-0.0233	0.0054	0.0366	0.0712	0.1162	0.1581	0.1527	0.1252	0.1388	0.1835	0.2590	0.3732
4	-0.2748	-0.2592	-0.2312	-0.2027	-0.1761	-0.1525	-0.1315	-0.0846	-0.0182	0.0402	0.0882	0.1437	0.1969	0.2301	0.2240	0.1875	0.1482	0.1318	0.1593	0.3289	0.6037
5	-0.1466	-0.1349	-0.1070	-0.0802	-0.0560	-0.0209	0.0061	0.0474	0.1100	0.1691	0.2217	0.2767	0.3017	0.3004	0.2683	0.2135	0.1442	0.0916	0.1229	0.2233	0.5236
6	-0.0529	-0.0439	-0.0164	0.0136	0.0413	0.0985	0.1390	0.1902	0.2511	0.3025	0.3508	0.3965	0.4164	0.3891	0.3239	0.2466	0.1818	0.1545	0.1469	0.2942	0.6019
7	0.0563	0.0608	0.0806	0.1013	0.1255	0.1855	0.2427	0.2843	0.3469	0.3979	0.4390	0.4698	0.4669	0.4164	0.3258	0.2473	0.1982	0.1619	0.1488	0.1966	0.6168
8	0.1782	0.1766	0.1880	0.1995	0.2161	0.2668	0.3286	0.3605	0.4136	0.4472	0.4608	0.4672	0.4214	0.3553	0.2744	0.2075	0.1683	0.1483	0.1210	0.1905	0.5558
9	0.2117	0.2096	0.2221	0.2342	0.2558	0.3142	0.3705	0.3979	0.4384	0.4591	0.4561	0.4406	0.4189	0.3887	0.3000	0.2194	0.1654	0.0855	0.0819	0.1917	0.6235
10	0.1796	0.1843	0.2030	0.2221	0.2582	0.3191	0.3632	0.3793	0.3900	0.3778	0.3578	0.3206	0.2931	0.2780	0.2596	0.1847	0.1029	0.0590	0.0742	0.1531	0.6788
11	0.1993	0.2137	0.2422	0.2714	0.3339	0.3797	0.3666	0.3325	0.2908	0.2650	0.3003	0.3077	0.2697	0.2400	0.1034	0.0179	0.0142	0.0339	-0.0006	0.2994	0.8733
12	0.1993	0.2325	0.2726	0.2916	0.2598	0.2383	0.1926	0.1022	-0.0882	-0.3279	-0.5247	-0.5644	-0.2928	0.0090	0.5251	0.5602	0.6236	0.7325	0.8541	1.0026	1.1897
13	0.2951	0.3295	0.3600	0.3302	0.2049	0.1746	0.1715	0.0643	-0.0656	-0.2852	-0.5150	-0.5587	-0.4203	-0.2374	-0.0142	0.3829	0.7283	1.1441	1.6543	2.2006	2.7076
14	0.4661	0.4833	0.4847	0.4010	0.2624	0.2311	0.2468	0.1487	-0.0040	-0.1686	-0.3318	-0.3706	-0.3020	-0.2458	-0.1498	-0.0441	0.2844	0.7843	1.3788	1.9823	2.5473
15	0.6487	0.6386	0.6205	0.5377	0.4032	0.3591	0.3761	0.2698	0.1696	-0.0730	-0.2033	-0.3040	-0.2523	-0.1724	-0.1136	-0.0521	0.2174	0.6443	1.1657	1.7568	2.3306
16	0.7921	0.7485	0.7018	0.6486	0.5420	0.4621	0.4615	0.3799	0.3216	0.2156	0.0100	-0.1177	-0.1609	-0.1844	-0.2007	-0.1196	0.0982	0.4075	0.8186	1.3015	1.7971
17	0.9088	0.8662	0.8036	0.7535	0.6588	0.5643	0.5108	0.4343	0.3702	0.3170	0.2488	0.1248	-0.0382	-0.1265	-0.2163	-0.2635	-0.1389	0.0912	0.3994	0.7445	1.1057
18	1.0058	0.9378	0.8618	0.8326	0.7576	0.6687	0.5920	0.5362	0.4373	0.3945	0.3353	0.2597	0.0965	-0.0633	-0.1998	-0.3022	-0.3185	-0.2145	0.0242	0.2899	0.5547
19	1.1182	1.0281	0.9277	0.8814	0.7829	0.6961	0.6290	0.6115	0.5520	0.5220	0.4199	0.3684	0.2259	0.0384	-0.2170	-0.3283	-0.3808	-0.3586	-0.2116	-0.0185	0.1786
20	1.3622	1.2441	1.1083	0.9914	0.8421	0.7360	0.6268	0.5805	0.5663	0.5197	0.4912	0.4726	0.3274	0.0531	-0.2420	-0.4445	-0.4395	-0.3454	-0.2312	-0.0724	0.1176
21	1.4761	1.3410	1.1816	1.0258	0.8538	0.7406	0.6070	0.5387	0.5031	0.4983	0.4849	0.4751	0.4521	0.3274	0.0165	-0.2807	-0.3312	0.0323	0.1447	0.1913	0.3895
22	1.2935	1.1641	1.0282	0.8895	0.7273	0.6103	0.4872	0.4424	0.4378	0.4563	0.4565	0.4661	0.4596	0.4072	0.2263	0.0051	-0.1883	-0.4472	-0.6450	-0.3006	0.5376
23	1.2935	1.1164	0.9509	0.7260	0.5489	0.4207	0.3828	0.3733	0.3161	0.2082	-0.0316	-0.2670	-0.3549	-0.1891	0.0265	-0.0758	0.0521	0.1338	-0.2736	-0.5712	-0.2933
24	1.1311	0.9725	0.8393	0.6443	0.4666	0.3695	0.3361	0.3347	0.3208	0.3023	0.2126	-0.1292	-0.3603	-0.6199	-0.6543	-0.6872	-0.6167	-0.5134	-0.4136	-0.3327	-0.2502
25	0.9313	0.7998	0.7019	0.5259	0.3926	0.3151	0.2882	0.2834	0.2801	0.2654	0.2987	0.4998	0.7751	1.1256	0.3236	-0.4645	-0.6872	-0.3700	-0.3675	-0.3442	-0.5742
26	0.9313	0.8336	0.7428	0.6530	0.5311	0.4461	0.3711	0.3423	0.3333	0.3454	0.3629	0.3666	0.3823	0.4195	0.5578	0.7416	0.9705	1.0503	0.8493	0.4095	-0.3725
27	0.5018	0.4409	0.3981	0.3719	0.3211	0.2850	0.2365	0.2177	0.2435	0.2753	0.2810	0.2762	0.2923	0.2767	0.1384	0.0773	0.0592	0.0536	0.0132	0.0318	0.1543
28	0.2991	0.2553	0.2204	0.1998	0.1640	0.1415	0.1078	0.0960	0.1418	0.2011	0.2343	0.2361	0.2358	0.2267	0.1202	0.0366	-0.0226	-0.0608	-0.1110	-0.1186	-0.0927
29	0.1166	0.0932	0.0703	0.0548	0.0346	0.0285	0.0144	0.0083	0.0379	0.0927	0.1240	0.1516	0.1637	0.1640	0.1062	0.0570	0.0175	-0.0218	-0.0714	-0.1072	-0.1224
30	-0.0829	-0.0897	-0.0979	-0.1050	-0.1098	-0.0901	-0.0726	-0.0535	-0.0179	0.0188	0.0333	0.0529	0.0769	0.0765	0.0647	0.0390	0.0174	-0.0092	-0.0436	-0.0747	-0.0994
31	-0.2315	-0.2322	-0.2300	-0.2277	-0.2023	-0.1643	-0.1320	-0.1051	-0.0570	-0.0196	0.0053	0.0129	0.0268	0.0288	0.0198	0.0252	0.0210	0.0172	0.0165	0.0179	0.0204
32	-0.3278	-0.3210	-0.3112	-0.3007	-0.2663	-0.2274	-0.1925	-0.1594	-0.1330	-0.1079	-0.0838	-0.0707	-0.0525	-0.0234	0.0054	0.0204	0.0313	0.0253	0.0287	0.0289	0.0279
33	-0.3478	-0.3483	-0.3497	-0.3501	-0.3120	-0.2635	-0.2195	-0.1914	-0.1822	-0.1707	-0.1535	-0.1038	-0.0608	-0.0172	0.0630	0.0781	0.0773	0.0494	0.0261	0.0149	0.0079
34	-0.2798	-0.2791	-0.2880	-0.3070	-0.2819	-0.2401	-0.2030	-0.1859	-0.1838	-0.1767	-0.1485	-0.1067	-0.0798	-0.0497	0.0013	0.0341	0.0571	0.0984	0.0335	-0.0105	-0.0552
35	-0.2319	-0.2348	-0.2435	-0.2634	-0.2493	-0.2160	-0.1868	-0.1792	-0.1835	-0.1823	-0.1659	-0.1546	-0.1425	-0.1307	-0.0852	-0.0536	-0.0432	-0.0029	-0.0079	-0.0265	-0.1061
36	-0.1758	-0.1779	-0.1919	-0.2119	-0.2158	-0.1764	-0.1550	-0.1575	-0.1645	-0.1707	-0.1780	-0.1989	-0.2282	-0.2287	-0.2095	-0.1780	-0.0851	0.0353	0.1198	0.0290	-0.1026

Tabela P.5.6. Parametar β_6 modela (7.14) efektivne logaritamske deformacije φ_e

$i \rightarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-0.2695	-0.2806	-0.2843	-0.3016	-0.3213	-0.3563	-0.3875	-0.3491	-0.2627	-0.2283	-0.2650	-0.2889	-0.2547	-0.2103	-0.1420	-0.0800	-0.0371	-0.0177	-0.0950	-0.1053	-0.1947
2	-0.4099	-0.4080	-0.4253	-0.4476	-0.4726	-0.6113	-0.6764	-0.4247	-0.1855	-0.1056	-0.1300	-0.1657	-0.1849	-0.1985	-0.2227	-0.1552	-0.1947	-0.2860	-0.2464	-0.1242	0.0106
3	-0.3350	-0.3180	-0.3864	-0.4577	-0.5349	-0.7219	-0.8053	-0.6228	-0.4228	-0.3091	-0.3284	-0.3798	-0.3787	-0.3740	-0.2752	-0.1427	-0.0627	-0.2648	0.6200	0.9144	1.4316
4	-0.4608	-0.4860	-0.5437	-0.5826	-0.6241	-0.7585	-0.8272	-0.6089	-0.4507	-0.3400	-0.3388	-0.2663	-0.1807	-0.1771	-0.1543	-0.0541	0.0517	0.2769	0.3330	0.8230	1.8841
5	-0.6622	-0.6882	-0.7134	-0.7316	-0.7520	-0.7850	-0.8055	-0.6469	-0.4644	-0.3409	-0.2853	-0.2171	-0.1153	-0.0966	0.0590	0.1665	0.3065	0.4711	0.5358	1.0364	1.6784
6	-1.0730	-1.0802	-1.0462	-0.9845	-0.9300	-0.7864	-0.7204	-0.5957	-0.3580	-0.2514	-0.1582	-0.0293	-0.0033	-0.0023	0.0080	0.0715	0.2208	0.4555	0.6167	1.3518	2.7015
7	-1.3073	-1.2894	-1.2435	-1.1826	-1.0929	-0.8866	-0.6810	-0.5038	-0.2401	-0.0974	0.0394	0.1288	0.0684	0.1676	0.1702	0.1809	0.3931	0.6480	0.7819	1.8512	3.5949
8	-1.4637	-1.3948	-1.3042	-1.2143	-1.1024	-0.9659	-0.7557	-0.5530	-0.3978	-0.3112	-0.2645	-0.2780	-0.1336	-0.0431	-0.0819	0.0922	0.5230	0.8818	1.3515	2.0630	3.5239
9	-1.4193	-1.3274	-1.2124	-1.1076	-0.9658	-0.8251	-0.5589	-0.2367	0.0012	0.1030	0.0776	-0.0107	-0.0708	-0.1916	-0.0782	-0.0226	0.2091	0.8654	1.4756	2.2091	3.3554
10	-1.1707	-1.1482	-1.0770	-1.0073	-0.8659	-0.7929	-0.4245	-0.0607	0.1543	0.2969	0.3383	0.4399	0.2912	0.1130	-0.0860	0.0631	0.4491	0.9538	1.3494	2.0395	3.3267
11	-0.8220	-0.9435	-1.2445	-0.9547	-1.0382	-0.8445	-0.2554	0.1451	0.4793	0.6114	0.5055	0.4932	0.3094	0.2264	0.5033	0.7539	0.9096	1.2824	1.8047	2.3983	3.0673
12	-0.8220	-0.9435	-1.2445	-0.9547	-1.0382	-0.8445	0.2075	0.5236	0.6976	0.8582	1.3081	0.1767	0.4142	0.6304	0.1737	0.7670	0.2387	-0.0481	0.0372	0.1230	0.3203
13	-0.6193	-0.7782	-1.0818	-0.7266	-0.9185	-0.7266	0.1433	0.3517	0.6997	0.5646	1.0948	2.1779	1.9351	1.4106	0.2052	-0.7617	-0.5815	-0.0118	0.4235	0.7885	1.1900
14	-0.7255	-0.7491	-0.9773	-0.5247	-0.1332	-0.0603	0.2064	0.4935	0.5297	0.6089	0.8741	0.6718	0.6518	0.9599	0.1610	-0.7379	-0.4175	-0.0424	0.6635	1.4885	1.9905
15	-1.3673	-1.2447	-1.0660	-0.5444	-0.6066	-0.8992	-0.9071	-0.6034	-0.0680	0.8227	1.8294	1.3229	0.7945	1.6428	2.3153	1.6077	1.4251	1.1897	1.0486	0.9946	1.3881
16	-3.3849	-2.8860	-2.3796	-1.6897	-1.3917	-1.4926	-1.3408	-0.8951	-0.9680	-0.2497	1.3210	1.6359	0.8293	1.5528	2.7416	3.2401	3.2680	2.6881	2.0520	1.3313	0.7100
17	-3.5386	-3.1989	-2.7151	-1.9691	-1.6863	-1.8603	-1.7134	-1.5095	-1.6997	-1.5323	-0.2660	1.4845	0.8533	0.3625	1.2384	2.2490	2.5163	2.3213	1.7496	0.8784	-0.0246
18	-3.1691	-2.8645	-2.6022	-2.0882	-1.7839	-1.9386	-1.8899	-1.6444	-1.8298	-2.3086	-1.8165	-0.3588	-0.0696	-1.1340	-0.9169	-0.2309	0.5567	0.8743	0.6306	0.1139	-0.6739
19	-3.3799	-3.0742	-2.8382	-2.3567	-2.3066	-2.4593	-2.3404	-1.9748	-1.6715	-2.0528	-1.8958	-1.3004	-0.6423	-1.4090	-2.4453	-1.6406	-0.9897	-0.6645	-0.5457	-0.7297	-1.3338
20	-4.1440	-3.7147	-3.3522	-3.1071	-3.1802	-3.2006	-3.1901	-2.8202	-2.1138	-1.8290	-2.1036	-2.0097	-1.3964	-1.4709	-2.9379	-3.7873	-1.7435	-1.0335	-0.5315	-0.2069	-0.1286
21	-5.6945	-5.1502	-4.6107	-4.2622	-4.0774	-3.8874	-3.7721	-3.2286	-2.4442	-2.0384	-2.1097	-2.5783	-2.9458	-2.3735	-1.3329	-0.2556	0.7229	1.4777	1.2217	-0.6559	-1.7081
22	-5.5955	-5.0511	-4.5451	-4.0961	-3.9089	-3.7323	-3.5671	-3.0047	-2.2833	-2.0970	-2.5355	-3.3404	-4.1308	-4.0956	-5.0657	-6.2518	-6.4256	-4.1735	-0.9851	1.2911	-1.0067
23	-5.5955	-4.8634	-4.1243	-3.9118	-3.7215	-3.1719	-2.4232	-2.7528	-3.9728	-5.4543	-6.8385	-7.2036	-2.1463	-0.1450	4.8588	-4.1301	-9.2582	-9.1111	-6.9851	-5.9851	-4.1193
24	-5.0709	-4.4326	-3.6825	-3.3802	-3.3084	-2.7798	-2.2529	-2.5177	-3.5011	-4.6792	-6.2980	-8.8091	-8.8675	-6.1436	-5.8402	-5.8100	-5.6642	-5.4211	-5.1398	-4.7495	-4.4097
25	-4.2493	-3.7233	-3.1045	-2.9227	-2.7069	-2.2658	-1.9247	-2.2915	-2.8648	-3.8260	-4.8538	-5.7894	-6.2847	-5.1570	-0.8221	-0.4451	-5.2582	-6.0482	-6.0508	-5.5900	-2.9550
26	-4.2493	-3.8482	-3.4764	-3.0754	-2.8850	-2.6672	-2.4542	-2.0785	-1.7546	-1.7367	-1.9622	-2.3939	-3.0356	-3.5426	-4.3309	-5.2398	-5.6867	-6.2168	-6.3099	-4.0597	-1.1449
27	-2.6147	-2.3662	-2.1229	-1.8250	-1.5945	-1.4675	-1.4653	-1.3602	-1.1962	-1.0992	-1.1478	-1.2744	-1.2748	-0.8741	-1.0847	-1.2387	-1.4246	-1.4971	-2.0027	-2.3176	-3.4982
28	-0.6633	-0.5131	-0.3662	-0.2128	-0.1187	-0.2676	-0.4522	-0.5624	-0.5633	-0.4857	-0.3984	-0.4990	-0.5784	-0.4329	-0.8127	-1.2603	-1.6755	-1.7814	-1.6002	-1.8275	-2.6857
29	1.1500	1.1986	1.2173	1.2318	1.1118	0.8937	0.6274	0.4281	0.2405	0.1165	0.0348	-0.1067	-0.2669	-0.3915	-0.6129	-0.7726	-0.9239	-0.9655	-1.0409	-1.1964	-1.4906
30	1.9772	1.9080	1.8279	1.7551	1.6275	1.5868	1.3941	1.1946	0.9976	0.7345	0.3759	-0.0066	-0.3049	-0.3568	-0.2941	-0.2686	-0.3407	-0.3636	-0.4378	-0.5326	-0.6513
31	2.8793	2.7478	2.5503	2.3421	2.0038	1.7297	1.3788	1.1726	1.0081	0.8141	0.5557	0.2889	0.0013	0.0210	0.0735	0.0714	0.0398	0.0093	0.0369	0.0660	0.0813
32	3.2292	3.0779	2.8989	2.7040	2.3727	2.0818	1.6790	1.4600	1.1684	0.9151	0.7219	0.5064	0.3071	-0.0061	0.0144	-0.0064	-0.0523	-0.0369	0.0904	0.1747	0.2324
33	3.3258	3.1704	2.9616	2.7497	2.4400	2.1579	1.7751	1.4838	1.1562	0.9261	0.7346	0.4374	0.1069	-0.2537	-0.5444	-0.5440	-0.4732	-0.2981	-0.0408	0.1867	0.2998
34	3.0463	2.9732	2.8188	2.6467	2.4092	2.1534	1.7770	1.4544	1.1360	0.9234	0.6661	0.2598	-0.1350	-0.4659	-0.7731	-0.8227	-0.6759	-0.2888	-0.0867	0.4626	0.6691
35	2.5635	2.5197	2.4378	2.3765	2.2857	2.1615	1.8398	1.5121	1.1893	0.9457	0.5710	0.0822	-0.3588	-0.7696	-1.0115	-1.2173	-1.4033	-1.1919	-0.7277	-0.3390	0.0928
36	2.1696	2.1450	2.1159	2.0494	1.9666	1.9712	1.7861	1.5392	1.2750	0.9914	0.7149	0.3238	-0.0796	-0.3416	-0.4575	-0.5123	-0.4122	-0.3575	-1.2312	-1.6195	-1.0935

Tabela P.5.7. Parametar β_7 modela (7.14) efektivne logaritamske deformacije φ_e

i \ j →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-0.3501	-0.3354	-0.3189	-0.1291	0.2237	0.6830	1.1575	1.3232	1.3266	1.3411	1.3926	1.4539	1.5005	1.1003	0.8538	0.6059	0.3861	0.2212	0.0600	-0.1212	-0.5380
2	-0.2218	-0.1643	-0.0814	-0.0005	0.0746	0.6377	1.0027	1.0031	1.0614	0.7353	0.5384	0.3386	0.1256	-0.1110	-0.3195	-0.4570	-0.5158	-0.6866	-0.9831	-1.2362	-1.4645
3	-0.2599	-0.2084	-0.1955	-0.1890	-0.1712	0.3317	0.7486	0.6114	0.4876	0.0755	-0.1512	-0.3874	-0.5616	-0.6952	-0.6662	-0.4643	-0.5670	-0.5759	-0.5571	-0.5002	-0.1796
4	-0.7449	-0.7862	-0.7750	-0.7865	-0.7924	-0.3254	0.0130	-0.0941	-0.1903	-0.3681	-0.4427	-0.4381	-0.4156	-0.4421	-0.3985	-0.2074	-0.1843	-0.1130	-0.2459	-0.6707	0.4346
5	-0.8690	-0.9019	-0.9321	-0.9556	-0.9689	-0.5902	-0.3104	-0.3338	-0.4093	-0.4857	-0.5620	-0.5676	-0.6118	-0.6922	-0.7333	-0.7375	-0.6405	-0.4163	-0.1485	-0.4837	-1.2085
6	-1.3490	-1.3622	-1.3724	-1.3889	-1.4015	-1.1739	-0.9267	-0.8438	-0.8951	-0.8959	-0.9293	-0.8549	-0.7337	-0.6249	-0.5631	-0.6851	-0.6589	-0.4634	-0.1533	-0.0905	-1.3820
7	-1.5674	-1.5823	-1.5782	-1.5890	-1.5058	-1.2729	-1.3013	-1.1567	-1.1441	-1.1567	-1.1574	-0.9472	-0.6486	-0.5518	-0.4959	-0.5577	-0.6409	-0.6083	-0.1511	-0.5588	-0.5481
8	-1.5289	-1.5460	-1.5368	-1.5318	-1.5058	-1.4113	-1.3130	-1.1511	-0.9982	-0.9499	-0.8397	-0.5440	-0.5643	-0.3462	-0.1389	-0.2313	-0.2849	-0.2315	-0.4391	-0.6020	0.7700
9	-1.7485	-1.7296	-1.6508	-1.5632	-1.4297	-1.4113	-1.4946	-1.3829	-1.2891	-1.2058	-0.9509	-0.6129	-0.3784	0.0420	-0.1346	-0.1431	-0.0082	-0.4657	-0.3168	-0.1635	1.3908
10	-2.3151	-2.2397	-2.0926	-1.9402	-1.7988	-1.6900	-1.7156	-1.4474	-1.2326	-1.0273	-0.9407	-0.9730	-0.6657	-0.1994	0.1655	0.1547	-0.1298	-0.1656	-0.0513	0.1500	3.4670
11	-2.9628	-2.7559	-2.4184	-2.0797	-1.6325	-1.6703	-1.5579	-1.4433	-1.3380	-1.1468	-0.6034	-0.5634	-0.3129	0.2474	0.1042	0.1834	0.2214	0.8507	1.5388	4.2295	6.4869
12	-2.9628	-2.4788	-1.6055	-1.4011	-1.8018	-1.1832	-0.6823	-0.2234	0.1462	1.0418	3.8305	4.8576	5.1301	4.2728	4.6552	4.4160	3.0035	1.0255	0.1811	-0.5188	-0.2459
13	-1.5680	-1.1972	-0.5237	-0.5192	-0.8601	-0.3472	-0.0363	-0.1528	0.4555	1.2110	1.8088	1.6628	1.7656	-0.1547	-1.266	1.1460	1.1990	0.9421	1.2895	2.3020	3.0343
14	0.8771	1.0279	1.5147	0.8796	0.3559	0.4811	0.6065	0.2965	-0.0308	-0.2344	1.1834	1.5414	1.6415	1.3190	-0.5889	-2.1305	-1.7135	-0.6473	0.2787	0.7621	0.8448
15	3.0808	2.8678	2.5992	1.6429	0.9131	0.8976	1.1498	1.1860	1.2248	-0.2568	-0.8656	-1.0858	-0.3831	1.6811	2.5320	1.2000	0.2137	0.3897	0.3627	0.4111	0.3035
16	4.0162	3.3644	2.8023	1.5324	0.7000	0.7187	1.3340	1.8084	2.2662	1.7179	0.3946	-1.1323	-2.2548	-0.2683	1.8619	2.7687	1.7230	0.9452	0.2178	-0.6574	-1.2478
17	3.5170	3.1221	2.6586	1.6775	0.9014	0.9344	1.5489	2.1048	2.7114	2.5737	2.0184	1.7130	-0.2177	-0.4331	0.7545	1.6981	0.9353	-0.2188	-2.0173	4.0775	-6.1005
18	2.5007	2.0215	1.7203	1.1059	0.8438	1.3270	1.9868	2.5151	3.2914	4.3727	4.3423	3.4162	2.1106	0.5706	0.5158	0.6873	-0.6614	-2.0882	-4.5005	-7.1708	-9.7875
19	1.8472	1.1807	0.7062	0.2377	0.7752	1.6198	2.2769	2.6388	3.3842	4.5753	5.2639	5.7408	4.2948	1.4995	-1.0858	-0.8953	-2.1157	-3.8712	-6.3916	-8.7715	-11.5510
20	1.5505	0.7476	0.1946	0.2179	0.8654	1.7209	2.4327	2.6547	2.8673	3.7368	4.9694	6.1905	5.4995	3.4687	0.3925	-3.1469	-3.0882	-4.3907	-6.3916	-8.7715	-11.5510
21	2.4498	1.4307	0.6489	0.7097	1.0363	1.6395	2.2435	2.5948	3.0286	3.8771	4.6567	5.8566	6.2706	5.7811	3.5105	1.2358	0.4411	1.3047	-0.3390	-5.0002	-6.9119
22	3.7649	2.6687	1.7005	1.4678	1.6568	1.8801	2.0549	2.3220	2.8961	3.8598	4.9790	5.8692	5.9491	5.0021	2.8665	0.7447	-1.8114	-3.4528	-0.6595	1.1051	-6.7324
23	3.7649	2.3074	1.5811	1.9487	2.1788	2.6421	3.1323	4.4298	5.6407	5.6489	3.2275	2.3621	6.8047	2.0841	-4.3880	-8.2735	2.3835	4.4468	4.2720	3.5683	-0.2994
24	3.3985	2.1943	1.5355	1.6620	1.9793	2.4126	2.9179	3.6290	5.0893	5.0663	4.4037	2.2531	2.2961	3.8833	2.6950	2.0240	1.5827	1.2796	0.9894	1.1760	1.2619
25	2.7654	1.8073	1.3563	1.7973	1.9458	2.2154	2.5134	2.9660	3.7183	4.7092	5.5132	6.6110	6.8779	7.3092	-5.4028	-6.1533	0.3847	3.4208	2.7502	4.7166	3.3824
26	2.7654	2.0990	1.4095	1.2517	1.5299	1.7536	1.8911	1.9679	2.3127	2.9534	3.3633	3.9729	4.3429	4.2950	4.2433	4.3545	4.5028	4.8446	3.5043	-1.4090	-4.3107
27	0.5921	0.2622	0.0743	0.1294	0.5723	0.9687	1.2523	1.5397	1.6395	1.9158	2.0163	2.0198	1.9394	1.7414	2.0916	1.9533	1.6763	1.3774	0.8993	0.9750	3.4572
28	-0.2858	-0.5315	-0.7031	-0.7154	-0.4859	-0.1300	0.2447	0.7120	1.0705	1.3825	1.4553	1.3764	1.1589	1.0217	0.7960	0.3517	-0.0207	-0.3205	-1.1315	-1.3309	-0.5727
29	-0.4355	-0.6679	-0.8826	-1.0034	-0.9925	-0.8617	-0.5520	-0.1386	0.2769	0.6473	0.7716	0.7900	0.6571	0.5814	0.2479	-0.1303	-0.3582	-0.5909	-0.9659	-1.2676	-1.3818
30	-0.1583	-0.2931	-0.4751	-0.6242	-0.8533	-1.0044	-0.8174	-0.5606	-0.3284	-0.0146	0.1468	0.1506	0.2415	0.3403	0.1854	-0.0403	-0.2146	-0.4113	-0.6260	-0.8313	-1.0130
31	-1.2537	-1.2671	-1.2252	-1.1572	-1.1882	-1.1681	-0.9525	-0.8101	-0.5842	-0.1392	0.1432	0.2865	0.3810	0.4961	0.4509	0.2947	0.1172	-0.0241	-0.0916	-0.1645	-0.2383
32	-2.1842	-2.1078	-1.9649	-1.8169	-1.6101	-1.5017	-1.2365	-1.0365	-0.8956	-0.5985	-0.3075	-0.0721	0.0909	0.4409	0.7054	0.6441	0.5469	0.4406	0.3511	0.2116	0.0239
33	-3.1194	-3.0477	-2.8589	-2.6389	-2.2582	-1.9196	-1.4157	-1.1714	-1.0534	-0.9463	-0.8029	-0.5119	-0.1501	0.3142	0.8208	1.0749	1.1233	0.9520	0.8433	0.6861	0.4598
34	-3.7314	-3.6111	-3.3328	-3.0470	-2.6192	-2.1661	-1.5490	-1.2121	-1.0285	-0.9527	-0.7389	-0.5064	-0.2108	0.0990	0.3590	0.7074	1.1320	1.1893	1.4822	1.6187	1.7628
35	-3.8997	-3.7884	-3.5464	-3.2948	-2.8881	-2.2928	-1.5994	-1.2242	-1.0163	-0.9430	-0.7806	-0.6833	-0.6456	-0.6433	-0.5629	-0.4712	-0.0506	0.5843	1.0556	1.3461	1.4558
36	-3.5668	-3.4735	-3.3155	-3.1756	-3.0783	-2.5493	-1.8061	-1.2904	-0.9550	-0.7236	-0.5925	-0.4869	-0.4465	-0.6444	-0.7574	-0.5577	-0.0714	0.5482	1.1096	1.0172	1.0503

Tabela P.5.8. Parametar β_8 modela (7.14) efektivne logaritamske deformacije φ_e

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-0.4141	-0.4030	-0.3915	-0.5036	-0.7394	-1.0818	-1.4189	-1.3367	-0.9705	-0.6975	-0.6462	-0.6985	-0.6189	-0.3542	-0.0484	0.3065	0.7293	1.1960	1.6277	1.8490	1.7185
2	0.1391	0.0433	-0.0215	-0.0820	-0.1359	-0.5784	-0.9273	-0.5333	-0.3025	-0.0699	0.3417	0.7070	1.1468	1.5403	1.8686	2.0135	1.7804	1.6582	1.0133	0.1903	-0.5888
3	0.2948	0.2009	0.2423	0.2869	0.3154	-0.0329	0.0546	0.4586	0.8251	1.1529	1.4121	1.6611	2.0499	2.4499	2.6264	2.3111	1.9545	1.2487	0.3593	-0.5492	-0.9764
4	0.3220	0.2819	0.3091	0.3078	0.2890	-0.0912	0.0067	0.3217	0.6671	0.9480	1.1246	1.2830	1.5851	1.9914	2.2401	2.1251	1.5932	0.6782	-0.0564	-1.2948	-1.6439
5	-0.6011	-0.6362	-0.6515	-0.6627	-0.6788	-1.1154	-1.0027	-0.6688	-0.3116	-0.0702	-0.0372	0.0768	0.3905	0.8062	0.9330	0.9396	1.0535	1.0630	0.7142	-0.4472	-0.3791
6	-1.1452	-1.1580	-1.1809	-1.2278	-1.2889	-1.8810	-1.7244	-1.4456	-1.1306	-0.8206	-0.7283	-0.6672	-0.4231	-0.1056	0.0463	0.1152	0.3049	0.3282	0.6257	0.1939	1.5196
7	-1.5357	-1.5064	-1.4787	-1.4692	-1.5278	-2.0734	-2.2606	-1.9795	-1.6019	-1.2877	-1.1589	-1.1183	-0.9049	-0.5291	-0.3153	-0.2358	-0.2927	-0.4488	0.2069	0.2672	3.0722
8	-1.9308	-1.8822	-1.7659	-1.6497	-1.6194	-2.2246	-2.4889	-2.3036	-1.9387	-1.6058	-1.2439	-1.0294	-0.3023	0.1176	-0.0582	-0.1144	-0.3467	-0.3080	0.2133	0.2107	3.7600
9	-2.0942	-2.0328	-1.8546	-1.6872	-1.6300	-2.0728	-2.3014	-2.1609	-1.8732	-1.5428	-1.2922	-1.0185	-0.6066	-0.2439	0.1244	-0.1011	-0.5418	-0.4690	0.2809	0.4021	2.3825
10	-1.4574	-1.4343	-1.2965	-1.1503	-1.1198	-1.6290	-1.8344	-1.5714	-1.2995	-1.0159	-0.7345	-0.1880	0.0158	0.2445	0.2976	0.4984	0.2920	0.4491	0.6507	0.8510	0.9692
11	-0.3389	-0.2731	-0.0811	0.1260	-0.2685	-0.4261	-0.4148	-0.1580	0.2104	0.4498	0.3288	0.6694	0.7205	0.6173	1.2486	1.1480	1.2372	1.1156	2.1140	1.8814	-0.5425
12	-0.3389	-0.1142	-0.0440	-0.1390	0.1190	0.1934	1.0348	1.3095	0.9520	1.8116	2.8295	2.6516	2.4317	3.2943	1.0548	0.0405	-0.1740	-0.2953	-2.0284	-3.8063	-4.2910
13	1.1335	1.5001	1.5885	0.8716	0.7033	0.4834	1.2407	1.0853	1.1612	2.6075	2.8786	2.5756	1.1912	1.6395	1.0568	-1.7569	-3.4428	-4.2366	-4.3597	-3.6420	-3.2613
14	1.7610	2.0718	1.8588	1.4643	1.1623	0.5073	0.6159	0.7077	-0.2039	0.3286	2.0057	2.5669	1.7947	1.6466	1.7841	1.5568	1.2146	1.3623	1.4038	1.8182	2.0071
15	1.1378	1.2904	1.2365	0.4260	-0.0226	-0.7010	-1.1377	-0.6861	-1.8825	-2.3901	-2.4133	-0.8463	1.0197	1.4447	1.7754	2.3912	1.6477	2.5942	3.2708	3.9409	4.4818
16	-1.7688	-1.8114	-1.9316	-2.5546	-2.8490	-3.0779	-3.5606	-2.7750	-2.8019	-3.0419	-2.9272	-1.6478	-0.9337	0.5999	1.7787	2.6015	3.1756	3.9775	4.9660	5.7110	6.4993
17	-6.8455	-6.5483	-6.0534	-6.3206	-6.3117	-6.2207	-6.0986	-5.4831	-5.9487	-4.6978	-3.7668	-2.7927	-2.3261	-1.4613	1.6252	3.9513	4.8327	5.4295	6.0851	6.8001	7.5693
18	-11.7490	-11.2280	-10.6010	-10.5800	-9.9058	-9.1823	-8.4789	-7.9037	-5.9487	-4.6978	-3.7668	-2.7927	-2.3261	-1.4613	1.6252	3.9513	4.8327	5.4295	6.0851	6.8001	7.5693
19	-16.8120	-15.9400	-14.9590	-14.3980	-12.9850	-11.6630	-10.5590	-9.9433	-8.2100	-6.3534	-4.1397	-2.8716	-1.5347	-1.0502	-0.0118	3.6447	5.9000	6.9894	7.4461	7.8867	7.5293
20	-20.7190	-19.5570	-18.2570	-16.8620	-14.6580	-13.0020	-11.3870	-10.3390	-9.0484	-7.3118	-5.6923	-4.2410	-2.0810	-0.5327	0.5720	1.6020	4.9049	6.3595	7.0138	7.7459	7.9114
21	-21.6480	-20.4140	-18.8230	-17.0710	-14.6970	-12.8520	-10.7970	-9.2581	-7.9362	-6.9230	-5.9227	-5.1267	-4.2862	-3.6886	-1.8904	-0.7542	1.6397	5.7742	7.6206	5.9161	3.5474
22	-18.0580	-17.0030	-15.8050	-14.0480	-11.7460	-10.0260	-8.3093	-7.1533	-6.4506	-6.1358	-5.9496	-5.4276	-5.1749	-4.5383	-4.4505	-4.4660	-4.5041	-2.0166	4.8282	9.1643	8.6702
23	-18.0680	-16.5570	-14.5220	-11.4460	-8.9895	-6.7860	-5.9485	-5.7279	-6.0000	-6.3315	-7.8985	-5.8596	3.2104	0.6412	5.6833	6.3446	-3.0423	-8.0463	-3.7255	-0.9128	-2.8025
24	-15.2180	-13.8670	-12.1710	-9.4402	-7.0607	-5.5027	-4.8134	-4.9326	-5.1097	-5.0237	-6.2906	-7.6757	-5.7421	-1.2195	-1.1349	-1.2085	-1.3283	-1.5207	-1.8979	-2.3670	-2.5651
25	-12.4230	-11.1930	-9.7205	-7.1819	-5.2990	-4.1312	-3.6064	-3.9738	-4.5105	-4.4786	-4.5650	-2.9242	-2.1627	1.1851	4.7533	1.3572	-4.7387	-5.8606	-5.4909	-4.5264	-0.3825
26	-12.4230	-11.5210	-10.6180	-9.3417	-7.4111	-6.0344	-4.9705	-4.3462	-3.9788	-3.8115	-4.1835	-4.5125	-4.0960	-3.8369	-3.0511	-2.2260	-1.4886	-0.6422	0.3499	1.7319	-0.1381
27	-7.2510	-6.5185	-5.8567	-5.0628	-3.7617	-2.6925	-1.7632	-1.2550	-1.2905	-1.4265	-1.7889	-2.3012	-3.0546	-2.9947	-1.7158	-0.6263	0.3511	0.8838	0.1043	-0.1697	-1.9271
28	-2.2193	-1.6506	-1.1210	-0.5835	0.1007	0.6220	1.1179	1.3657	1.0113	0.4563	-0.0239	-0.5933	-1.1825	-1.7073	-1.6644	-1.7319	-1.7843	-1.7381	-1.3365	-1.2877	-1.8985
29	2.6760	2.8553	3.0418	3.2200	3.2672	3.4268	3.4717	3.4104	2.9622	2.262	1.4850	0.7273	0.0514	-0.3297	-0.7927	-1.4008	-1.7559	-1.7395	-1.4491	-1.2724	-1.3440
30	5.0060	4.9519	5.0159	5.0932	5.2049	5.3412	5.2033	4.9271	4.4424	3.8190	3.0557	2.0940	1.2806	0.8363	0.2240	-0.6838	-1.3450	-1.4748	-1.3854	-1.3513	-1.3896
31	7.0811	6.8670	6.6111	6.3028	6.1777	5.9155	5.4634	5.0941	4.5451	3.9183	3.3491	2.7677	1.9633	1.6014	1.0430	0.1747	-0.8993	-1.3023	-1.5580	-1.8530	-2.1467
32	7.6564	7.4289	7.1652	6.9115	6.7028	6.3458	5.7908	5.3736	4.6164	3.9866	3.3456	2.8313	2.2881	1.4624	0.8380	0.4163	-0.4484	-0.9966	-1.6801	-2.4194	-3.2076
33	7.3036	7.2060	7.0689	6.9754	6.6801	6.2574	5.6531	4.1416	4.3903	3.8376	3.3922	2.7251	2.0411	1.2913	0.5454	0.1977	0.0498	-1.1638	-1.7105	-2.4254	-3.3537
34	6.9710	6.7335	6.5134	6.4338	6.0919	5.7262	5.1709	4.7307	4.2044	3.8358	3.5466	2.6524	1.9788	1.3895	0.8165	0.4140	0.4521	-1.3503	-1.8731	-1.7426	-2.3544
35	7.4526	7.1946	6.8779	6.6643	6.1281	5.6507	5.0847	4.7466	4.3498	4.0736	3.7741	3.0138	2.3367	1.6923	0.6086	-0.5333	-1.1452	-1.8436	-1.8835	-0.9644	-1.3192
36	8.0021	7.7212	7.2131	6.9239	6.7407	6.0130	5.3961	5.0767	4.6723	4.2959	4.1172	4.2244	4.0589	3.1795	2.2958	1.7587	0.6980	-0.9098	-3.2567	-3.7327	-2.5489

Tabela P.5.9. Parametar β_9 modela (7.14) efektivne logaritamске deformacije φ_e

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-0.2808	-0.2698	-0.3124	-0.3695	-0.4300	-0.4756	-0.5176	-0.5895	-0.6956	-0.7553	-0.7865	-0.9553	-1.2620	-1.6226	-1.9616	-2.2318	-2.4563	-2.6693	-2.7289	-2.5926	-2.0792
2	-1.9564	-2.0264	-2.1177	-2.2067	-2.2903	-2.3166	-2.3605	-2.4197	-2.4764	-2.7153	-3.0349	-3.2436	-3.2790	-3.1263	-2.9603	-2.8519	-2.6076	-2.2024	-1.5882	-0.9180	-0.2905
3	-3.0460	-3.1033	-3.1349	-3.1620	-3.1801	-3.1533	-3.2846	-3.2975	-3.3423	-3.5165	-3.6764	-3.6366	-3.4953	-3.2713	-3.0087	-2.6867	-2.4085	-1.8895	-1.2798	-0.6667	-0.3174
4	-3.3432	-3.3615	-3.3922	-3.4074	-3.4125	-3.3692	-3.4444	-3.4460	-3.5662	-3.7095	-3.7765	-3.6113	-3.3829	-3.1524	-2.8991	-2.6637	-2.6005	-2.4569	-2.0798	-1.1508	-0.8762
5	-3.1710	-3.1868	-3.1926	-3.2040	-3.2146	-3.1259	-3.1893	-3.2908	-3.4912	-3.6527	-3.6398	-3.3940	-3.1768	-3.0055	-2.6100	-2.3739	-2.3623	-2.2936	-2.1165	-2.0669	-2.4480
6	-3.3192	-3.3193	-3.3075	-3.2839	-3.2492	-3.0333	-3.0573	-3.1776	-3.3648	-3.5238	-3.4539	-3.2460	-3.0951	-2.7799	-2.4476	-2.2680	-2.1743	-2.1610	-2.4540	-2.3083	-2.7338
7	-3.5861	-3.5837	-3.5848	-3.5765	-3.5300	-3.3387	-3.2594	-3.4482	-3.6259	-3.7479	-3.6160	-3.3822	-3.1057	-2.6399	-2.2772	-2.1686	-2.0135	-1.9551	-2.2963	-2.4040	-2.7654
8	-4.0138	-3.9971	-4.0275	-4.0580	-4.0393	-3.7907	-3.6268	-3.7292	-3.7572	-3.7601	-3.6365	-3.4621	-3.0570	-2.5829	-2.3377	-2.3030	-2.1639	-2.1963	-2.0438	-1.6782	-1.7848
9	-4.8082	-4.7736	-4.7958	-4.8025	-4.7529	-4.4921	-4.1828	-4.8721	-3.8898	-3.6017	-3.3030	-2.8715	-2.4414	-2.0785	-1.7685	-1.7163	-1.7858	-1.9026	-1.9600	-0.7592	0.9395
10	-4.7787	-4.7392	-4.7696	-4.7953	-4.8118	-4.4939	-4.0630	-3.8608	-3.6050	-3.3306	-3.1995	-2.9472	-2.4677	-1.9785	-1.7178	-1.3894	-1.1656	-1.1799	-1.3801	-0.0472	3.1425
11	-4.1247	-4.0962	-4.0970	-4.0940	-3.9403	-3.2903	-2.9636	-2.7195	-2.5367	-2.6287	-2.6434	-2.3427	-1.6730	-1.2955	-0.7314	-0.6210	-0.7431	-0.2889	0.0370	2.5950	5.0565
12	-4.1247	-4.0585	-3.8561	-3.1437	-2.5569	-2.6664	-2.4498	-1.9164	-0.9582	0.5782	1.9751	1.8136	1.5066	0.9207	3.4973	2.8914	2.9800	3.4152	3.6671	3.9723	3.8824
13	-3.3447	-3.2469	-3.0350	-2.0919	-1.5555	-2.4575	-2.7627	-2.0279	-0.2385	1.0284	1.1505	0.6995	0.3476	0.3037	1.0318	2.0585	2.7375	3.5415	4.5612	5.5682	6.3122
14	-2.4092	-2.3059	-2.0084	-0.9511	-0.6036	-1.5779	-2.2720	-2.1516	-0.9781	1.0032	1.9121	1.9466	1.7745	0.8043	0.2106	0.1973	0.9843	2.6530	4.3919	5.7259	7.0026
15	-0.5784	-0.5117	-0.4372	0.4326	0.7126	-0.7070	-0.9367	-1.3112	-0.7911	-0.0213	1.3182	2.0045	2.6074	2.3239	1.0613	0.0214	0.1704	1.7024	3.5489	5.4578	7.2106
16	1.6985	1.6346	1.5799	2.2570	2.1136	1.1402	0.2114	-0.3387	-0.2703	0.2033	0.9050	1.7536	2.5846	2.2716	1.3963	0.4901	0.6544	2.0877	3.8856	5.8831	8.0358
17	2.0418	2.1442	2.2851	2.9405	2.7184	1.7163	0.8527	0.1599	-0.3224	-0.2889	0.3187	0.8163	2.1828	2.5151	1.5028	0.5192	0.8950	2.4895	4.3001	6.1339	8.1281
18	2.0476	2.2979	2.4991	3.0076	2.9914	2.1257	1.2816	0.6624	-0.0444	-0.8156	-0.7862	-0.0849	0.9250	2.3860	1.9793	1.2321	0.9841	1.8658	3.9020	6.2334	8.4162
19	1.5257	1.8722	2.2056	2.7503	2.4480	1.7639	1.1949	0.9243	0.5358	-0.1826	-0.5720	-0.6190	0.3153	2.4850	3.4079	2.0872	1.8079	2.7651	4.4354	6.3768	8.6176
20	1.8276	2.1387	2.4482	2.5577	2.1141	1.4866	0.8929	0.5778	0.2795	-0.3523	-1.2280	-1.6554	-0.8626	1.3933	3.6468	4.9245	3.8002	3.5583	4.8826	6.6933	8.8391
21	2.1489	2.4294	2.6369	2.5239	2.0966	1.4077	0.6251	0.2365	-0.1750	-0.7150	-1.3113	-2.0478	-2.3361	-1.1505	1.8687	5.5690	9.8051	11.8240	9.2038	6.2642	6.5402
22	2.7814	3.0148	3.0813	2.6186	1.8425	1.0502	0.3831	0.0292	-0.3706	-0.8569	-1.7403	-2.5109	-2.9154	-2.7147	-1.8108	-0.9099	-0.1648	1.8685	9.5233	13.0310	7.8652
23	2.7814	3.0537	2.7594	1.7141	0.7370	0.0933	-0.2932	-1.0311	-1.7382	-0.7871	0.5743	1.4437	1.9906	2.2411	10.3390	11.5790	12.2260	12.5680	10.7540	5.6242	1.7205
24	2.6755	2.9202	2.6566	1.7046	0.7509	0.0665	-0.5203	-0.8865	-1.7363	-1.9102	-1.9640	0.2153	2.1934	4.3075	4.1469	4.0256	4.0635	4.0855	4.0184	3.8630	3.7226
25	2.2480	2.493	2.2562	1.2646	0.4759	-0.0982	-0.6505	-0.9720	-1.4563	-1.6852	-2.0446	-2.2396	-1.9065	-1.7928	3.5109	1.7637	0.3005	-1.6994	-2.4758	1.1361	6.3143
26	2.2480	2.4177	2.4701	2.1333	1.3628	0.7233	0.1646	-0.2348	-0.6637	-1.0793	-1.4294	-1.8218	-2.2399	-2.3234	-2.3979	-2.5820	-2.6697	-3.0453	-6.0875	-2.9932	-0.6540
27	1.1617	1.2960	1.3693	1.2314	0.7062	0.2555	-0.1206	-0.4789	-0.7122	-0.9077	-1.0292	-1.1189	-1.1445	-0.8437	-0.8602	-0.6916	-0.5528	-0.1650	0.7976	1.6838	1.4163
28	0.2168	0.2749	0.2837	0.1734	-0.1870	-0.5617	-0.7748	-1.0280	-1.1511	-1.1308	-0.9062	-0.7667	-0.5942	-0.2649	-0.1748	-0.1097	-0.0717	0.1134	0.7006	0.8602	0.4112
29	-1.0805	-1.0049	-0.9505	-0.9540	-1.1197	-1.2819	-1.2865	-1.3097	-1.3342	-1.1308	-0.8849	-0.5204	-0.2156	-0.0454	0.0881	0.0446	0.1103	0.2707	0.4870	0.6728	0.7631
30	-1.7240	-1.6731	-1.6519	-1.6251	-1.5738	-1.6310	-1.5252	-1.3971	-1.2960	-1.1257	-0.8674	-0.5579	-0.3006	-0.1269	0.2062	0.2781	0.2815	0.3838	0.4512	0.5174	0.5812
31	-1.9345	-1.9566	-1.9524	-1.9435	-1.9447	-1.9475	-1.8175	-1.6283	-1.3269	-1.0167	-0.7509	-0.5570	-0.5012	-0.1931	0.1643	0.3900	0.3976	0.3983	0.3876	0.3751	0.3752
32	-2.0429	-2.1287	-2.1624	-2.1569	-2.1876	-2.1999	-2.1163	-1.9472	-1.7349	-1.4665	-1.1408	-0.9422	-0.7561	-0.3705	0.0360	0.3187	0.3800	0.3615	0.3181	0.2408	0.1513
33	-2.3608	-2.4434	-2.4566	-2.4272	-2.4031	-2.3524	-2.1861	-2.0164	-1.8037	-1.6106	-1.3642	-0.9289	-0.4818	0.0176	0.4732	0.5923	0.6429	0.6287	0.5409	0.3624	0.1078
34	-1.9950	-2.0673	-2.1054	-2.1562	-2.2117	-2.1464	-1.9554	-1.7981	-1.6374	-1.5328	-1.2833	-0.8847	-0.5119	-0.1361	0.2248	0.4833	0.7480	0.9496	0.5517	0.1021	-0.2302
35	-1.6439	-1.7324	-1.7647	-1.8207	-1.9549	-1.9593	-1.7910	-1.6511	-1.4833	-1.3813	-1.2428	-1.1000	-0.9749	-0.8673	-0.7181	-0.6153	-0.5373	-0.2268	0.2001	0.3536	-0.1950
36	-1.5435	-1.5477	-1.5886	-1.6556	-1.7572	-1.7246	-1.6570	-1.5164	-1.3242	-1.2508	-1.2322	-1.3019	-1.3926	-1.2930	-1.1738	-1.1481	-0.9529	-0.5147	-0.4494	-0.7148	-0.6736

Tabela P.5.10. Parametar β_{10} modela (7.14) efektivne logaritamske deformacije φ_e

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-1.2574	-1.2494	-1.2177	-1.2082	-1.2271	-1.2628	-1.2877	-1.2979	-1.3211	-1.3240	-1.2377	-1.0900	-0.9195	-0.7640	-0.7096	-0.7713	-0.8735	-0.9839	-1.0064	-0.7386	-0.0995
2	-0.7881	-0.7389	-0.6800	-0.6293	-0.5855	-0.7492	-0.7933	-0.8429	-0.8267	-0.5118	-0.4509	-0.3404	-0.1314	-0.0878	-0.0897	-0.0506	0.0220	0.4400	0.9616	1.3929	1.7555
3	0.6164	0.7248	0.7466	0.7591	0.7587	0.5537	0.3225	0.3247	0.4814	0.6972	0.8163	1.0224	1.1608	1.1348	0.9932	0.7463	0.7982	0.9921	1.1810	1.3787	1.3647
4	2.2462	2.3014	2.3053	2.3215	2.3285	2.1126	1.8734	1.8999	2.0603	2.0589	2.0218	2.1310	2.1032	1.9413	1.6186	1.3300	1.3730	1.5365	1.6631	1.3585	0.4982
5	3.4229	3.3748	3.5205	3.5534	3.5784	3.4106	3.2328	3.3127	3.3641	3.2575	3.2240	3.2367	3.0409	2.6540	2.0408	1.8563	1.7796	1.8866	2.2995	2.4656	0.5647
6	4.4608	4.4866	4.5091	4.5305	4.5417	4.4969	4.3295	4.4154	4.3787	4.2573	4.2743	4.1822	3.8940	3.3420	2.7727	2.5572	2.3263	2.5082	2.6166	2.4220	-1.1116
7	5.8751	5.8554	5.8088	5.7698	5.7529	5.6359	5.6530	5.7302	5.6950	5.6984	5.8233	5.6732	5.1933	4.4801	3.7116	3.1844	2.9188	2.9137	2.9895	1.7030	-3.0239
8	7.4953	7.4212	7.3179	7.2122	7.0844	6.8499	6.8746	6.9305	6.8942	6.9748	7.0979	6.9852	6.4457	5.7713	4.8713	4.0752	3.2740	2.9192	2.2776	-0.0873	-4.0981
9	8.7946	8.6741	8.4949	8.2967	8.0395	7.7817	7.7389	7.7829	7.7806	7.8913	7.9056	7.6205	7.2047	6.5955	5.3964	4.1597	3.2696	2.2367	0.6779	-1.7151	-5.2173
10	9.3049	9.1914	9.0300	8.7711	8.6490	8.3484	8.2405	8.1927	8.0423	7.9375	7.7240	7.2636	6.5661	6.0400	5.5206	4.3942	3.0244	1.1492	-0.7546	-1.9924	-5.4860
11	9.6061	9.5705	9.4767	9.3761	9.2542	8.6070	8.2993	7.7404	7.1544	6.6130	6.2553	5.7948	5.1656	4.5704	3.3339	1.9419	-0.0886	-1.2577	-1.2095	-3.2736	-5.9371
12	9.6061	9.5165	9.1483	8.0605	7.4349	7.1860	6.6389	4.9141	1.9229	1.0302	2.0366	1.8078	0.9073	-0.4739	-5.9851	-7.3586	-7.1955	-6.5245	-5.6574	-4.7094	-4.3166
13	9.7390	9.6992	9.2943	7.8084	6.7188	6.8126	6.2420	3.8444	2.2971	2.5675	2.5200	2.1934	2.0646	0.9014	-1.3772	-4.1783	-4.8803	-4.8944	-4.7045	-4.6248	-4.8759
14	9.2948	9.2367	8.7173	7.2016	6.2759	6.3423	6.0543	4.5039	3.4185	4.7317	5.4892	4.0793	3.1925	3.0022	1.5408	-0.1139	-1.0632	-1.8081	-2.6817	-3.5303	-4.3450
15	9.2879	9.1308	8.8090	7.5811	6.6706	6.5167	6.5579	5.4904	4.9025	5.0860	5.8516	5.0668	3.6222	3.1074	2.0595	0.8862	0.1862	-0.0341	-0.4040	-1.1119	-2.1051
16	10.7420	10.2970	9.7327	8.5944	7.7939	7.2557	6.9329	5.7493	4.9563	5.4010	5.9941	5.2559	3.0531	2.1318	2.1027	1.1229	0.3414	0.2430	0.1935	0.2242	-0.0283
17	10.0500	9.8079	9.4314	8.7209	7.9625	7.2526	6.8610	6.0642	4.8791	4.4426	4.7468	4.4443	3.2688	1.8981	1.4791	1.3800	1.4009	1.4831	1.3203	0.9253	0.5002
18	10.0320	9.5803	9.0732	8.5428	7.8286	7.1057	6.7225	6.1027	4.5882	4.0416	4.1231	4.0874	3.3986	2.6827	1.6967	1.0135	1.0954	1.5310	1.4233	0.9449	0.0606
19	10.9970	10.3360	9.5447	8.7306	7.6859	6.8921	6.3049	5.6094	4.1005	2.9746	2.7095	3.1556	2.8788	2.5500	2.4687	1.0373	0.4006	0.6272	0.8042	0.5382	-0.6107
20	11.2840	10.4590	9.4668	8.2491	6.8571	5.8214	5.0057	4.4685	3.5503	2.4347	1.9367	2.1476	1.7540	1.6948	1.8366	1.8129	0.5008	-0.7118	-0.8053	-1.2723	-2.5182
21	10.5260	9.7187	8.8427	7.7717	6.4335	5.3360	4.2767	3.3892	2.4411	1.8753	1.4421	1.5483	1.6280	1.4166	0.3000	-1.1358	-2.0318	-4.6005	-4.8481	-4.4139	-3.1395
22	9.6195	8.9073	8.1831	7.2929	6.0514	4.9429	3.8928	2.7784	1.7667	1.2430	0.8764	0.5045	0.3254	0.1757	0.5711	0.9900	1.0315	-0.2947	-1.9765	-8.2767	-9.3389
23	9.6195	8.6202	7.5044	5.8175	4.4279	3.2520	2.0947	1.8639	2.1906	3.8117	5.8419	6.2414	5.7489	-8.4184	-11.7810	-5.5273	-2.7637	-0.4422	3.3486	4.4677	6.2695
24	9.0042	8.1055	7.1512	5.6937	4.1406	2.7396	1.6623	1.5791	1.5213	1.7597	2.7853	5.9849	7.7554	10.1500	9.6948	9.0432	8.5446	8.1135	7.6576	7.0054	6.1522
25	8.2341	7.5103	6.7085	5.3216	3.8781	2.5513	1.5165	1.5041	1.4376	1.2152	0.9889	0.5276	0.8716	0.3181	2.3445	13.3110	14.4530	10.5770	5.8136	5.4438	7.0307
26	8.2341	7.7136	7.2273	6.5923	5.5761	4.4028	3.2175	2.1402	1.3020	0.8454	0.6391	0.4839	0.1334	-0.3241	-0.8910	-1.3772	-1.4813	-0.5042	0.5666	-0.0915	1.5713
27	6.7927	6.4022	6.0273	5.6008	4.8476	3.9055	3.0290	2.1304	1.5909	1.1641	0.9094	0.7396	0.7517	0.8449	1.8629	3.0891	4.0230	4.5906	3.9865	1.0605	-0.9776
28	5.6898	5.2866	4.9230	4.5635	3.9920	3.4248	2.7631	2.1313	1.7945	1.4659	1.0493	0.8849	0.7452	0.6447	0.7071	0.9339	1.1543	1.3993	1.6071	2.0050	2.8073
29	4.8639	4.4758	4.1239	3.7910	3.4000	2.9964	2.4710	1.9662	1.6812	1.3998	0.9494	0.5638	0.3506	0.4328	0.3724	0.3780	0.4669	0.6665	0.9719	1.3036	1.7372
30	3.5283	3.2496	3.0441	2.8574	2.5448	2.3715	2.0987	1.8706	1.7007	1.3484	0.9667	0.6433	0.3615	0.6125	0.3190	0.2237	0.2393	0.3740	0.5835	0.7827	0.9722
31	2.9498	2.8095	2.7061	2.6452	2.4491	2.3369	2.1105	1.8797	1.5325	1.1749	0.9369	0.7007	0.7803	0.7536	0.4625	0.1348	-0.0699	0.0298	0.1628	0.2742	0.3636
32	3.0808	2.9557	2.8169	2.6966	2.4180	2.2055	1.8767	1.5718	1.3785	1.1955	1.0436	0.8619	0.6148	0.1661	-0.0463	-0.1907	-0.3057	-0.0376	0.1613	0.2812	0.3639
33	3.4140	3.3423	3.2197	3.0903	2.7943	2.4440	1.9676	1.5906	1.3587	1.2474	1.1205	0.7783	0.4359	0.0860	-0.2269	-0.2237	-0.3460	-0.2719	-0.1989	-0.1485	-0.1326
34	2.7368	2.7571	2.7163	2.7544	2.7326	2.4547	2.0214	1.6412	1.3308	1.1509	0.8088	0.4515	0.1411	-0.0626	-0.1776	-0.2928	-0.4828	-0.6733	0.0536	0.1687	-0.0736
35	2.0787	2.1014	2.0984	2.2520	2.5838	2.4700	2.0986	1.7045	1.3324	1.0601	0.6327	0.3316	0.0930	-0.0937	-0.2773	-0.5389	-0.7575	-0.7915	-0.8315	-1.5919	-2.0373
36	1.7237	1.6775	1.7736	1.9985	2.3482	2.4607	2.2361	1.8331	1.4127	1.0178	0.6462	0.2775	0.0009	-0.1214	-0.1608	-0.2283	-0.4670	-0.9085	-1.0527	-1.1460	-0.9048

Tabela P.5.11. Parametar β_{11} modela (7.14) efektivne logaritmiske deformacije φ_e

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-0.8019	-0.8857	-0.9012	-0.7566	-0.4722	-0.0543	0.3048	0.4209	0.1981	0.0945	0.2166	0.3264	0.2488	0.0251	-0.3842	-0.9945	-1.5954	-1.9399	-2.0705	-1.9748	-1.4357
2	-0.2397	-0.2956	-0.2813	-0.2677	-0.2610	0.2370	0.7079	0.1937	-0.3626	-0.7992	-0.9699	-1.0600	-1.2048	-1.6553	-2.1537	-2.5627	-2.2710	-1.9660	-1.7517	-1.6605	-1.6400
3	0.3611	0.3520	0.3120	0.2634	0.2278	0.6800	1.0229	0.6642	-0.3227	-0.9266	-1.1307	-1.2655	-1.5790	-2.1037	-2.7647	-2.7697	-2.7450	-2.9254	-3.1483	-3.3303	-3.9944
4	0.0457	-0.0348	-0.0769	-0.1513	-0.2177	0.1582	0.4179	-0.1832	-1.0826	-1.6600	-1.9428	-2.2185	-2.6557	-3.1225	-3.1946	-2.9274	-2.6675	-2.3571	-2.2671	-3.3906	-5.9142
5	-0.8545	-0.9158	-1.0081	-1.1035	-1.1852	-1.0044	-0.8320	-1.4583	-2.7866	-2.8375	-3.1597	-3.4438	-3.6041	-3.7402	-3.5015	-3.1472	-2.6080	-1.9857	-1.7098	-1.8148	-5.1665
6	-1.6278	-1.6794	-1.8117	-1.9818	-2.1257	-2.2711	-2.3074	-2.9164	-3.7177	-4.2073	-4.4956	-4.6567	-4.7273	-4.3278	-3.4923	-2.8505	-2.3774	-2.1565	-1.7393	-2.4121	-6.0987
7	-2.6197	-2.6239	-2.6943	-2.7888	-2.9296	-3.1702	-3.3856	-3.9825	-4.8310	-5.3913	-5.6133	-5.5621	-5.1861	-4.2925	-3.1530	-2.5090	-2.0937	-1.4608	-0.8908	-0.4600	-6.2972
8	-3.9644	-3.8743	-3.8795	-3.8843	-3.9273	-4.0290	-4.3533	-4.8475	-5.5530	-5.9070	-5.8643	-5.6539	-4.8936	-3.7738	-2.5469	-1.8615	-1.3886	-0.9021	0.1818	0.4853	-5.2008
9	-4.2615	-4.1506	-4.1778	-4.1986	-4.3095	-4.6601	-4.9478	-5.3526	-5.8905	-6.0432	-5.7784	-5.2705	-4.6744	-4.0794	-2.9956	-1.9298	-0.9998	0.3920	1.1271	1.1078	-4.8858
10	-3.9304	-3.9058	-3.9899	-4.0769	-4.3936	-4.7316	-4.9064	-5.1152	-5.1687	-4.8279	-4.4238	-3.8740	-3.1323	-2.7395	-2.5286	-1.5468	-0.6681	1.2078	1.6420	1.5167	-4.5215
11	-4.2876	-4.4059	-4.6494	-4.8995	-5.3797	-5.4031	-4.9895	-4.3951	-3.6814	-3.2181	-3.4859	-3.5267	-2.7465	-2.1219	-2.0093	1.7313	2.4319	2.5557	2.4536	-0.5113	-6.7969
12	-4.2876	-4.5544	-4.6221	-4.1723	-3.4892	-2.7019	-1.6670	0.3251	4.3535	8.9761	11.6150	10.8510	7.9888	2.9472	4.3001	6.2481	-7.8784	-9.9311	-11.4950	-13.0370	-1.6360
13	-5.3110	-5.6903	-5.6840	-4.3720	-2.3207	-1.6814	-1.5640	0.6723	4.1217	8.0955	10.9520	10.7270	8.7527	4.7587	0.5423	4.2327	-9.3026	-15.5060	-22.7030	-30.3560	37.5700
14	-6.8261	-7.0046	-6.5241	-4.6905	-2.4960	-1.8801	-2.0922	-0.3874	3.0033	6.3975	8.2646	7.7927	6.8389	5.6172	2.8307	0.3279	-4.7676	-12.3240	-20.4940	-28.6430	36.8800
15	-7.7053	-7.5702	-7.1408	-5.3631	-3.1164	-2.2488	-2.5234	-1.1635	1.4252	5.6006	7.3779	6.9484	5.3397	4.7958	4.0195	1.9643	-2.6693	-9.9421	-17.8400	-25.7440	33.4600
16	-7.7218	-7.1444	-6.3405	-5.1436	-3.6269	-2.4822	-2.3113	-1.3146	-0.0388	2.1088	4.8774	4.6577	3.6909	4.0003	4.8171	3.6356	0.0003	-5.6222	-12.2190	-19.2100	26.3300
17	-7.3006	-6.7547	-5.8828	-4.8504	-3.7906	-2.6905	-1.9913	-0.9925	0.0173	0.8062	1.7351	2.8111	3.1325	2.8442	3.6513	4.5413	2.2595	-2.1556	-7.5010	-12.8290	10.4170
18	-6.8140	-5.9345	-4.8637	-4.2792	-3.6251	-2.7997	-2.0997	-1.6046	-0.5981	-0.1211	0.1891	0.3428	1.7188	2.9781	3.2867	3.7695	3.1485	0.6150	-3.6298	-8.0111	13.1260
19	-7.3492	-6.2703	-4.9692	-4.2545	-3.2332	-2.4785	-1.9919	-2.1284	-1.5857	-1.4406	-0.7235	-0.6692	0.3617	2.0672	4.4207	4.0981	3.2600	1.5567	-1.5470	-5.2579	-8.3550
20	-9.6473	-8.4126	-6.8494	-5.5864	-4.2304	-3.2893	-2.3843	-2.3528	-2.5948	-1.9838	-1.7025	-1.5248	-0.2899	2.3143	5.2309	6.6253	5.1097	2.2440	-0.3408	-3.1088	-5.6377
21	-10.9350	-9.7232	-8.1815	-6.7959	-5.4564	-4.5496	-3.4351	-2.9121	-2.5622	-2.3743	-2.0573	-1.9865	-1.9603	0.0930	4.3275	9.2781	11.2570	7.0207	1.8292	-2.3939	-6.6257
22	-9.7676	-8.6264	-7.4410	-6.5332	-5.3712	-4.4695	-3.3234	-2.7199	-2.4733	-2.3292	-1.9926	-2.1005	-2.0151	-1.2371	0.7513	3.0650	4.8871	7.8195	11.2410	8.6007	-6.9739
23	-9.7676	-8.2190	-6.9987	-5.3776	-3.8513	-2.5054	-1.7112	-0.9817	0.4091	2.7361	6.6442	9.0475	9.5106	4.7294	1.5268	3.5322	10.0810	12.8320	15.6430	15.9040	14.8750
24	-8.6462	-7.2325	-6.3653	-5.1578	-3.5242	-2.3097	-1.6116	-0.9548	-0.2147	0.4176	2.1518	7.4607	10.8850	15.0050	14.6100	14.9100	14.8600	14.6480	14.5810	14.6540	14.6210
25	-7.0915	-5.9303	-5.3491	-4.1820	-3.0276	-2.0419	-1.5379	-0.9163	-0.2879	0.4070	0.8527	0.3916	-0.8809	-5.3092	3.4562	8.1359	14.1050	13.6170	13.1930	13.0770	17.7320
26	-7.0915	-6.2157	-5.4666	-5.0096	-4.2357	-3.5802	-2.8193	-2.3998	-2.1356	-1.9822	-1.7440	-1.4795	-1.6778	-1.6534	-1.9912	-2.6675	-4.1292	-4.8983	-6.4748	-1.8230	4.5885
27	-3.9570	-3.3882	-3.0103	-2.9328	-2.7393	-2.5706	-2.1808	-1.8934	-2.1306	-2.3729	-2.0883	-1.5591	-1.3307	-0.8983	-0.0926	0.4644	0.6960	0.8504	1.7709	3.1742	2.7237
28	-3.0041	-2.6267	-2.3589	-2.2889	-2.1230	-2.0307	-1.6580	-1.3456	-1.6325	-2.0652	-2.1002	-1.7126	-1.1980	-0.6759	0.0799	0.6506	1.1693	1.5436	2.1805	2.4846	2.1393
29	-2.0402	-1.8207	-1.5976	-1.4732	-1.3878	-1.2604	-1.1583	-0.8583	-0.8577	-1.2597	-1.3336	-0.9225	-0.6234	-0.0048	0.4332	0.9202	1.3367	1.8001	2.1011	2.1167	1.9692
30	-0.2474	-0.1813	-0.1131	-0.0373	-0.1328	-0.4505	-0.4789	-0.4263	-0.6306	-0.8716	-0.8000	-0.7295	-0.6242	-0.3289	0.0713	0.6445	1.0921	1.3893	1.6397	1.8391	1.9692
31	0.8759	0.8679	0.8744	0.9153	0.4894	0.0198	-0.1787	-0.2821	-0.6207	-0.7236	-0.5152	-0.3297	-0.2680	-0.0464	0.4300	0.7484	1.1778	1.2596	1.1670	1.0616	0.9303
32	1.8935	1.7723	1.6744	1.5815	1.0564	0.5410	0.1969	-0.0609	-0.0603	0.0998	0.3335	0.5855	0.5157	0.4655	0.5012	0.7054	0.8475	1.0403	1.0596	1.0227	0.9828
33	1.8356	1.7761	1.8181	1.8616	1.3285	0.7189	0.3023	0.1262	0.4264	0.7160	0.8804	0.5389	0.3200	0.2017	-0.2299	0.0677	0.2498	1.0223	1.4743	1.6219	1.6593
34	0.1084	0.1848	0.4683	0.8888	0.7126	0.3358	0.1477	0.1958	0.5201	0.7215	0.5470	0.2997	0.2728	0.2623	0.0309	0.0177	0.0293	0.3982	1.9468	2.7196	3.5099
35	-1.3060	-1.1206	-0.7456	-0.1843	-0.0460	-0.1601	-0.1601	0.0114	0.3287	0.4859	0.2776	0.2142	0.1147	-0.0094	-0.3941	-0.6340	-0.3177	0.7563	2.5386	3.2033	4.3314
36	-2.4208	-2.2723	-1.8095	-1.2932	-1.0485	-1.1835	-1.0185	-0.6277	-0.2414	0.0147	0.1466	0.1297	0.1418	0.0527	0.0414	0.0111	-0.2930	-0.4958	-0.1536	2.0383	3.5112

Tabela P.5.12. Parametar β_{12} modela (7.14) efektivne logaritamske deformacije φ_e

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-3.8204	-3.7809	-3.5234	-3.0611	-2.5219	-1.9653	-1.5263	-1.4964	-1.7287	-1.8214	-1.6116	-1.3071	-1.0959	-1.0472	-1.0755	-1.1932	-1.4849	-2.0725	-2.8916	-3.4915	-3.1096
2	-4.5198	-4.3136	-3.8247	-3.3754	-2.9465	-2.2546	-1.5917	-1.9141	-2.1615	-1.7535	-1.6459	-1.4863	-1.4234	-1.3438	-1.5093	-1.8699	-2.0669	-2.1330	-1.4654	-0.1575	1.2382
3	-4.1043	-3.8066	-3.3234	-2.8790	-2.4534	-1.7912	-1.6118	-1.7995	-1.9428	-1.5792	-1.1770	-0.6903	-0.6109	-0.7553	-1.2553	-1.7020	-1.9114	-1.6269	-0.7965	0.6698	1.5477
4	-2.9213	-2.6281	-2.1269	-1.6247	-1.1490	-0.4562	-0.1203	-0.2005	-0.2359	0.0031	0.3309	0.7242	0.6891	0.2010	-0.5562	-1.3151	-1.4950	-1.0906	-0.0384	1.7170	2.3445
5	-0.6638	-0.4311	0.0739	0.5360	0.9532	1.6695	2.0549	1.8589	1.7566	1.8518	2.2300	2.5775	2.3725	1.6346	0.7964	0.0224	-0.7787	-1.1888	-0.2627	2.2018	2.6760
6	1.3192	1.4640	1.8444	2.2212	2.5854	3.4049	3.7426	3.7040	3.5151	3.4296	3.6920	3.9132	3.6213	2.9279	2.2736	1.6249	0.7510	0.3131	0.2135	1.7324	0.6258
7	3.0905	3.1538	3.3857	3.6247	3.9180	4.5115	5.2060	4.9337	4.5835	4.4672	4.6865	4.8423	4.5675	4.0281	3.2751	2.4157	1.8524	1.8494	1.5320	2.1337	-2.3599
8	4.5538	4.5623	4.6222	4.6864	4.7649	5.3660	6.0562	5.7129	5.2571	5.0815	5.0230	4.8960	4.3097	3.6923	3.2184	2.4812	1.9343	1.7461	1.9297	1.9935	-3.6445
9	5.6542	5.6004	5.4974	5.3868	5.2649	5.7529	6.3306	6.0147	5.6437	5.5352	5.3331	5.0412	4.7411	4.0514	3.1465	2.5246	2.2642	2.1985	1.3522	1.0928	-3.2360
10	5.6520	5.6089	5.5261	5.4332	5.3100	5.7852	6.1370	5.6028	5.1670	4.8729	4.6172	4.0921	3.7919	3.1842	2.5209	1.6474	1.5647	1.1545	0.5056	0.0774	-3.2847
11	5.2880	5.1568	4.9014	4.6271	4.5703	5.0287	4.8158	4.2923	3.7145	3.2026	2.9006	2.5251	2.2140	1.6613	0.5590	0.5813	0.0571	-0.8662	-2.9730	-5.2209	4.6121
12	5.2880	4.9449	4.5569	4.4934	4.1926	3.8478	2.7591	1.7618	0.8998	-0.0747	-2.6108	-4.4319	-3.3652	-3.9208	-5.1666	-5.8566	-4.7214	-2.6736	0.0540	3.0784	3.4032
13	3.2731	2.8918	2.6140	3.0728	3.0374	3.0103	1.7189	0.8904	0.5284	-0.1414	-1.8519	-2.1972	-0.8254	-0.3737	-0.2062	-0.0149	0.8577	1.5945	1.8257	0.9057	-0.0180
14	1.4089	1.1736	1.2365	1.8245	2.1987	2.7884	2.1555	1.4650	2.6378	4.0100	1.1264	-1.5182	-1.1341	-0.8473	-0.6578	-0.0670	-0.7273	-2.4344	-3.2510	-3.6242	-3.6514
15	1.8566	1.9081	2.2311	3.4129	4.3853	5.2725	5.2239	3.7959	4.7363	6.8544	6.7038	3.1407	-0.4072	-1.8324	-2.7041	-2.8425	-2.0525	-3.2044	-3.0378	-1.7301	-1.0525
16	6.6030	6.8872	7.2738	8.4296	8.9934	9.0857	8.7479	6.6426	5.8164	6.7952	6.8634	4.0217	1.3616	-1.7847	-3.3863	-4.5061	-3.5127	-3.6464	-3.1603	-1.4489	-0.0974
17	12.7410	12.6930	12.5010	13.1410	13.1190	12.6210	11.6680	9.9733	7.8184	6.7573	6.2689	3.6935	1.3227	-2.0198	-4.0693	-4.7015	-4.2754	-4.1671	-3.2251	-1.1010	0.8595
18	18.8940	18.7310	18.3750	18.5040	17.4950	16.0120	14.3630	12.4840	8.8609	6.1376	4.0953	2.0805	0.8763	0.3655	-3.1954	-5.7060	-5.5042	-5.0066	-3.3429	-1.2494	0.5040
19	24.9350	24.5190	23.8190	23.2060	21.0380	18.7490	16.5430	14.5170	10.8860	6.9984	3.0645	0.2485	-1.3691	-0.3670	0.7622	-4.0091	-5.9180	-5.8422	-4.2566	-2.3159	-0.2725
20	30.0680	29.1730	27.9190	25.9120	22.5390	19.6020	16.6290	14.2280	11.3790	7.9426	4.6557	1.6963	-1.1907	-2.1563	-0.5139	0.9795	-3.5745	-5.4000	-4.6288	-3.2383	-1.5414
21	31.0830	30.0080	28.3910	25.7110	21.9380	18.7860	15.3130	12.3720	9.5415	7.0332	4.7779	2.5288	0.5225	-0.4210	-1.6933	-1.4697	-1.7410	-5.2872	-7.4220	-3.0839	0.6211
22	25.6920	24.8550	23.7430	21.1610	17.5960	14.7890	12.0330	9.6604	7.4103	5.6110	3.9964	2.1097	1.1133	0.6807	1.5817	2.4198	3.1800	0.6473	-7.7599	-11.3260	-5.3242
23	25.6920	24.4380	21.9130	17.0240	13.2650	9.6930	7.2254	5.7046	4.9894	3.7102	3.2422	6.0122	11.0320	10.2560	6.7930	5.8513	5.3772	6.2306	7.4437	8.8706	9.5317
24	22.3110	21.1350	18.9280	14.5920	10.8790	7.8916	5.7046	4.9894	3.7102	3.2422	6.0122	11.0320	10.2560	6.7930	5.8513	5.3772	6.2306	7.4437	8.8706	9.5317	9.7255
25	18.8860	17.8150	15.9000	11.7610	8.6011	6.1808	4.4177	4.1982	3.7948	2.6770	2.5452	2.9805	5.2609	2.1649	8.8710	14.3800	20.8240	20.9490	14.5340	6.9437	2.7031
26	18.8860	18.1340	17.2670	15.3300	12.2600	9.7809	7.6586	6.0468	4.6064	3.4395	3.1613	2.5032	1.2000	0.8067	1.6543	2.9453	4.1874	4.7390	2.8510	4.7983	3.1580
27	12.7770	12.0540	11.2790	10.0830	7.7335	5.6977	3.9079	2.5579	1.9405	1.4730	1.4551	1.7317	2.2579	2.0380	0.2632	0.3237	0.8877	1.5926	2.8616	3.6432	3.8050
28	6.3995	5.7663	5.0978	4.2801	2.8576	1.6866	0.5432	-0.3315	-0.4072	-0.3458	-0.2265	0.2760	1.0791	1.6240	1.2292	1.4557	1.9526	2.3290	2.6706	3.6870	4.9933
29	0.1116	-0.1432	-0.3813	-0.6891	-1.1730	-1.7089	-2.2195	-2.6122	-2.4422	-2.0999	-1.6862	-1.0463	-0.0947	0.5117	0.8619	1.3450	1.7488	1.8897	1.9857	2.2145	2.6411
30	-4.2221	-4.2230	-4.2495	-4.2893	-4.5029	-4.6384	-4.6494	-4.4933	-4.0883	-3.7776	-3.2071	-2.2056	-1.2891	-0.7160	-0.3204	0.4783	1.1310	1.3099	1.3156	1.3609	1.4800
31	-6.9952	-6.8497	-6.6329	-6.3415	-6.2784	-5.9908	-5.6055	-5.2315	-4.7912	-4.3570	-3.7962	-3.0103	-2.0942	-1.8104	-1.4773	-0.6680	0.4121	0.7931	0.8933	1.0300	1.1725
32	-7.5416	-7.4601	-7.3388	-7.2093	-7.2576	-6.9999	-6.6500	-6.3290	-5.4199	-4.6276	-3.8549	-3.1275	-2.6786	-2.0921	-1.7261	-1.1635	-0.3005	0.2135	0.6581	1.0696	1.5658
33	-6.8818	-6.9297	-6.9661	-7.0561	-7.1505	-7.0547	-6.8860	-6.4912	-5.4705	-4.5492	-3.8267	-3.1887	-2.5792	-1.9217	-1.1267	-0.6654	-0.6680	0.3846	0.5437	0.7900	1.2679
34	-7.1326	-6.9675	-6.8728	-6.8647	-6.7010	-6.6142	-6.4628	-6.1386	-5.4661	-4.8318	-4.5047	-3.5613	-2.8484	-2.1421	-1.3384	-0.9847	-1.3247	0.4026	1.0688	0.4023	0.2883
35	-8.0883	-7.8462	-7.5882	-7.3495	-6.8455	-6.7004	-6.5792	-6.4308	-6.0462	-5.6760	-5.4697	-4.6262	-3.8086	-3.0249	-1.8635	-0.8198	-0.2157	1.1604	1.9000	0.4564	-0.2351
36	-8.8418	-8.6349	-8.1705	-7.8158	-7.4886	-7.1297	-7.0237	-7.0432	-6.8709	-6.6586	-6.5877	-6.9310	-6.9817	-5.9771	-4.7198	-3.7889	-2.1424	0.1748	3.7314	5.0335	2.7184

Tabela P.5.13. Parametar β_{13} modela (7.14) efektivne logaritamске deformacije φ_e

$i \rightarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	-6.6090	-6.5217	-6.0476	-5.2753	-4.4128	-3.6083	-2.9737	-2.4872	-2.0036	-1.5274	-1.0642	-0.6239	-0.2405	0.1224	0.5656	1.0665	1.4958	1.5846	1.1133	0.2147	-0.5706
2	-5.6313	-5.4084	-4.6359	-3.9196	-3.2321	-2.2419	-1.4560	-1.0680	-0.9267	-0.3878	0.4737	1.2812	1.8990	2.4674	2.5518	2.0860	1.2430	0.2487	-0.8887	-1.1977	-1.1851
3	-5.0408	-4.7201	-3.8833	-3.1103	-2.3825	-1.3648	-0.2227	0.1527	0.3399	0.9355	1.8047	2.6762	3.2442	3.6057	3.2007	2.3098	1.1549	0.0118	-0.6510	-0.2933	0.6588
4	-5.1425	-4.8425	-3.9760	-3.2194	-2.5365	-1.5586	-0.2389	0.1393	0.5402	1.3682	2.2895	3.1649	3.7306	3.7945	3.3714	2.4848	1.3488	0.3487	0.3848	0.9860	2.6923
5	-4.7972	-4.5745	-3.8832	-3.2335	-2.6465	-1.8736	-0.5798	-0.2596	0.2523	1.0251	1.7265	2.4767	2.8636	2.7050	1.9898	1.0276	0.3709	0.1233	1.0916	2.6413	4.8416
6	-4.3524	-4.1921	-3.6654	-3.2067	-2.7908	-2.4309	-1.1242	-0.5307	-0.1386	0.5722	1.1952	1.8584	2.2593	2.2830	2.0709	1.3288	0.7124	0.3738	1.6106	3.8313	6.9399
7	-3.8223	-3.6611	-3.1751	-2.7469	-2.4391	-2.1959	-1.2865	-0.9480	-0.6418	-0.1472	0.3637	1.0241	1.6619	2.1228	2.0055	1.3188	0.6441	0.7204	2.5818	5.1047	8.1751
8	-3.6711	-3.5004	-3.0192	-2.5305	-2.1389	-1.9236	-1.2703	-1.2077	-1.0054	-0.6094	0.0233	0.6139	1.3777	1.9240	1.8907	1.4148	0.9644	1.5477	3.6996	6.2641	9.0141
9	-3.2038	-3.0332	-2.5396	-2.0638	-1.7437	-1.5647	-1.0604	-1.2062	-1.2282	-1.0830	-0.5794	-0.0441	0.7569	1.2438	1.3049	1.1575	1.2624	2.3206	4.7346	7.0088	8.3088
10	-2.9595	-2.8180	-2.3138	-1.8051	-1.4941	-1.3295	-1.0707	-1.0989	-0.9630	-0.5832	-0.1283	0.4210	1.1684	1.4142	1.2071	1.2067	1.8138	3.6963	5.6474	6.6282	6.9895
11	-2.6186	-2.4824	-2.0472	-1.6050	-1.5481	-0.9382	-0.7655	-0.4503	0.0659	0.5942	0.8657	1.2824	1.5287	1.5592	1.9975	3.5741	5.3105	5.7079	5.5098	5.4247	5.1356
12	-2.6186	-2.1675	-1.3825	-0.5281	-0.2098	0.7187	1.9185	3.1242	4.6788	7.0322	7.2536	5.2985	7.9082	8.7468	5.5047	3.2838	2.3555	1.6376	0.5305	-0.0338	-0.1781
13	-1.8680	-1.4518	-0.7023	-0.0120	0.5309	1.4453	2.1065	2.6052	4.1704	6.8976	6.3364	5.5860	5.0771	4.6452	3.7124	2.4041	0.3163	-1.4866	-2.3761	-2.5477	-3.1706
14	-0.8801	-0.5583	0.0587	0.8327	1.5581	2.2213	2.4149	2.8309	3.5782	4.8210	4.4994	3.1541	3.0171	3.4469	3.3018	3.1755	1.7954	-0.4556	-1.3643	-0.9677	-1.1220
15	0.1247	0.3202	0.7091	1.1282	2.2639	3.2226	3.1123	3.2717	3.4333	4.3914	2.4073	-0.2982	-0.7296	0.8474	3.0633	4.1492	2.9436	0.7288	-0.6748	-0.0508	0.8070
16	0.0566	0.2116	0.6692	1.0174	1.8024	2.9734	3.2680	3.7855	4.1718	4.5295	2.9506	-0.7467	-3.4811	-1.9610	1.2529	3.7708	3.4451	1.8221	1.3521	2.3613	3.0184
17	-0.0138	0.3102	0.8848	1.1218	1.4883	2.4164	2.9571	3.5981	4.9149	5.4018	3.4658	0.7211	-2.0179	-2.3120	-0.7724	1.8639	2.3690	1.1639	0.9609	2.0440	2.8729
18	-0.2172	0.3302	1.1406	1.3333	1.6567	2.5317	3.0568	2.9624	4.1900	4.9324	3.7602	1.1689	-1.0719	-1.9058	-0.5309	1.3574	1.9007	0.9922	0.3598	0.4443	0.6201
19	-1.5668	-0.8481	0.1356	0.5221	1.6417	2.7272	3.1545	2.4522	2.8983	3.6986	3.6178	2.1374	0.5182	-0.9584	-0.4199	1.1835	1.7069	0.7280	-0.4249	-1.3548	-2.1512
20	-2.2576	-1.6593	-0.8380	-0.0992	1.1217	2.1256	2.7213	2.0550	1.5208	2.4215	3.3667	3.5577	2.8304	1.0266	1.1054	0.8475	1.7148	0.8483	-0.1138	-0.1521	0.1360
21	-1.8136	-1.6520	-1.1846	-0.8390	-0.2904	0.6355	1.6136	1.7968	1.9193	2.1987	2.7937	2.8730	3.3889	2.4718	0.9884	-0.9005	-3.0761	-3.9140	-3.0983	5.0576	6.0533
22	-1.6902	-1.6337	-1.4690	-1.3262	-0.5482	0.3607	1.3268	1.8351	1.9235	2.0418	2.3907	2.5587	2.4506	-4.7386	-7.1138	6.4746	15.6840	13.2490	7.6682	3.4825	9.6277
23	-1.6902	-1.5825	-1.2124	-0.2704	1.1245	2.3882	2.6221	3.1751	3.6109	4.0365	3.4627	2.7113	5.9497	4.7386	3.1775	2.0102	3.0514	4.6459	6.2945	7.3606	8.2571
24	-1.1004	-0.9608	-0.8579	-0.2824	1.2771	2.4291	2.7914	3.0910	3.4196	3.7232	3.8348	3.0252	3.2562	5.6380	3.1775	2.0102	3.0514	4.6459	6.2945	7.3606	8.2571
25	-0.5101	-0.2888	-0.1062	0.7064	1.7530	2.6412	2.9368	3.0699	2.9952	3.2056	4.5284	10.4720	15.4410	18.5290	19.1140	8.7834	13.2120	18.8730	13.7030	5.1307	2.3808
26	-0.5101	-0.3388	-0.1966	-0.2225	0.4868	1.2084	1.8847	2.2448	2.4206	2.6246	2.6149	2.2551	2.3166	3.0114	6.6855	11.2660	15.0090	17.2590	15.3940	14.5240	1.1942
27	-0.0448	0.1963	0.4087	0.6206	1.0076	1.6048	2.1377	2.6580	2.6173	2.4946	2.4235	2.3749	1.8924	1.3557	0.5808	1.6574	3.3335	4.3325	3.9520	6.5092	6.8574
28	0.8082	0.9895	1.1585	1.3194	1.4582	1.8440	2.2859	2.8530	2.9931	2.7843	2.6132	2.5338	2.6920	2.3514	1.2247	0.5197	0.4076	0.3042	0.2999	1.1699	1.8145
29	2.2383	2.2543	2.3142	2.3758	2.1793	2.3538	2.6054	2.9875	3.2756	3.0348	2.7118	2.5419	2.7977	2.7756	1.9140	0.9453	0.4446	0.0807	-0.1029	-0.2666	-0.5244
30	1.9110	1.8635	1.9464	2.0649	2.0126	2.2848	2.5946	2.9294	3.1087	2.9968	2.8278	2.6496	2.7811	2.6093	1.9479	1.2081	0.6789	0.1743	-0.2821	-0.7707	-1.2542
31	1.3109	1.2129	1.1731	1.1455	1.1833	1.3265	1.5023	1.7509	1.8597	2.0842	2.3792	2.6945	2.7534	2.5016	2.0011	1.5495	1.0547	0.4469	-0.2693	-0.9905	-1.6906
32	0.8163	0.7002	0.6435	0.5996	0.6010	0.6234	0.5931	0.7243	0.9512	1.4675	2.1084	2.4957	2.4433	2.2452	1.8611	1.8369	1.3562	0.6276	-0.3467	-1.4848	-2.6198
33	0.0124	-0.1044	-0.1407	-0.1455	-0.2555	-0.3258	-0.4291	-0.3138	0.0923	0.6955	1.2228	1.3012	1.4009	1.5646	1.9695	2.3464	2.1870	1.2502	0.3321	-0.8593	-2.2109
34	-1.7107	-1.7540	-1.6711	-1.4769	-1.3596	-1.2269	-1.1477	-0.8742	-0.4290	0.0993	0.4570	0.4680	0.6898	1.0522	1.4507	1.7253	1.9808	1.5121	1.6534	1.3540	0.5059
35	-2.5048	-2.4466	-2.3238	-2.0900	-2.0089	-1.8797	-1.7831	-1.5100	-1.2264	-0.9199	-0.8135	-0.8283	-0.8085	-0.8345	-1.0811	-1.4492	-0.8771	1.0880	3.2945	4.1151	3.2804
36	-2.3276	-2.4025	-2.4852	-2.3953	-2.2532	-2.4760	-2.4278	-2.1863	-2.0870	-1.9836	-1.8464	-1.8783	-2.1559	-2.7284	-2.8453	-2.2804	-1.1093	0.4083	2.3182	4.4980	3.9868

Tabela P.5.14. Parametar β_{14} modela (7.14) efektivne logaritamске deformacije φ_e

$i \downarrow j \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.7751	0.8268	0.8438	0.7228	0.4776	0.1215	-0.2555	-0.2580	-0.0693	0.0231	-0.0737	-0.1629	-0.0923	0.0950	0.3928	0.8228	1.2507	1.5156	1.6054	1.5203	1.1812
2	0.5277	0.5700	0.5702	0.5705	0.5752	0.1239	-0.2479	0.1445	0.5411	0.9224	1.0922	1.1588	1.2239	1.4826	1.7698	2.0124	1.7802	1.5528	1.3933	1.3029	1.2709
3	0.2145	0.2254	0.2622	0.3049	0.3343	-0.0852	-0.3765	-0.0073	0.6398	1.1557	1.3267	1.3826	1.5233	1.7959	2.1354	2.0227	1.9874	2.0690	2.1802	2.2697	2.6539
4	0.4806	0.5452	0.5824	0.6456	0.7006	0.3376	0.1192	0.5788	1.2430	1.6759	1.8380	1.9114	2.0894	2.3134	2.2765	2.0146	1.8485	1.6501	1.6246	2.3049	3.9182
5	0.9654	1.0158	1.0937	1.1750	1.2450	1.0154	0.8892	1.3539	1.9781	2.3666	2.5441	2.6258	2.6650	2.7273	2.5052	2.2405	1.8907	1.4579	1.2317	1.4129	3.9117
6	1.5362	1.5761	1.6744	1.8001	1.9037	1.8682	1.8630	2.3153	2.9111	3.2380	3.3761	3.3934	3.3829	3.0474	2.4328	2.0135	1.7097	1.5455	1.2544	1.7012	4.5163
7	2.2759	2.2809	2.3310	2.4005	2.4978	2.5075	2.6158	3.0580	3.6635	4.0396	4.1284	4.0020	3.6630	2.9990	2.1964	1.7788	1.5073	1.0744	0.6412	0.4427	4.4298
8	3.2181	3.1538	3.1605	3.1678	3.1803	3.0970	3.2749	3.6251	4.0780	4.2892	4.2049	3.9788	3.4334	2.5925	1.7044	1.2644	0.9548	0.5316	-0.0964	-0.3401	3.4368
9	3.5378	3.4477	3.4541	3.4508	3.4710	3.6102	3.7543	4.0177	4.3394	4.3767	4.1090	3.6501	3.1614	2.6417	1.9041	1.2103	0.5954	-0.2008	-0.7341	-1.0022	2.6174
10	3.3762	3.3325	3.3650	3.3969	3.5656	3.6798	3.7259	3.8125	3.7728	3.4552	3.1401	2.7387	2.1233	1.7063	1.4766	0.8018	-0.1260	-0.9541	-1.2300	-1.4293	1.6492
11	3.6181	3.6471	3.7466	3.8476	4.0288	3.9263	3.6048	3.1642	2.6250	2.2781	2.3449	2.3236	1.6344	1.0701	-0.2533	-1.5702	-2.0259	-2.2852	-2.3599	-1.2612	2.4060
12	3.6181	3.6882	3.5340	3.0849	2.5877	1.8838	0.9421	-0.6853	-3.8241	-7.5634	-9.9079	-9.2092	-7.0398	-3.1340	1.5553	3.1777	4.5754	6.2928	7.5096	8.6419	10.2180
13	3.8983	4.0640	3.8985	2.8957	1.5098	1.0538	0.8197	-0.9657	-3.9976	-7.1569	-9.1584	-8.6948	-7.1639	-3.9292	-0.6852	2.2780	5.8825	10.2040	15.0340	20.0630	24.9240
14	4.3547	4.4702	3.9732	2.7064	1.2643	0.9187	1.0236	-0.2843	-2.9812	-5.7771	-7.5430	-7.1676	-6.3760	-5.2219	-2.6390	-0.3475	3.2605	8.1523	13.4760	18.9680	24.4390
15	4.2064	4.1555	3.9109	2.7466	1.2825	0.7625	0.9385	-0.1028	-2.1907	-5.0213	-6.4622	-6.1923	-5.2350	-5.1240	-4.3328	-2.2082	1.4945	6.4834	11.8850	17.2790	22.5940
16	3.5542	3.3250	2.9121	2.2083	1.3373	0.6614	0.4962	-0.3078	-1.4502	-3.0323	-4.9093	-4.6078	-3.6863	-4.1563	-4.8573	-3.8223	-0.7805	3.2875	7.9629	12.9190	17.8670
17	3.3735	3.0804	2.5519	1.8745	1.2785	0.6317	0.0951	-0.6870	-1.5725	-2.1975	-2.8603	-3.6380	-3.5626	-3.2690	-3.7281	-4.1512	-2.2322	0.9883	4.9743	9.0457	13.2890
18	3.2249	2.7090	2.0143	1.5667	1.1177	0.5724	0.0438	-0.3718	-1.2483	-1.8229	-2.0931	-2.0811	-2.7499	-3.3672	-3.3928	-3.5179	-2.5497	-0.5152	2.7875	6.2046	9.8803
19	3.8394	3.2131	2.3768	1.8080	1.0147	0.4066	-0.0217	-0.0232	-0.6162	-1.0238	-1.7292	-1.8894	-2.2996	-2.9742	-3.9268	-3.4792	-2.4643	-0.9445	1.5995	4.6482	7.0529
20	5.4652	4.7595	3.7661	2.8585	1.8471	1.0774	0.3315	0.2335	0.3165	-0.3191	-0.7248	-1.1104	-1.9326	-3.4394	-4.8190	-4.9892	-3.7830	-1.4592	0.6571	2.9285	4.9093
21	6.1369	5.5046	4.5923	3.6463	2.7045	2.0113	1.1742	0.7217	0.3760	0.0465	-0.3277	-0.5737	-0.6692	-2.1305	-4.8921	-8.2053	-9.9703	-7.6136	-3.1982	1.6480	5.2315
22	4.8869	4.3268	3.7296	3.2213	2.4724	1.8879	1.1134	0.6487	0.3481	0.0682	-0.2984	-0.3251	-0.3354	-0.7093	-1.6747	-2.8136	-3.5211	-5.4640	-10.0950	-8.8385	4.7320
23	4.8869	4.1242	3.4869	2.4175	1.4140	0.4091	-0.2411	-0.9528	-2.0431	-3.7230	-5.9252	-7.4304	-8.9617	-4.9215	-2.6960	-2.7659	-9.6369	-12.5070	-14.2900	-13.2240	1.0360
24	4.1216	3.3977	2.9848	2.2524	1.1602	0.2883	-0.2483	-0.8167	-1.5132	-2.0008	-2.8079	-6.0998	-8.7087	-12.2240	-11.6500	-11.7060	-11.6010	-11.4110	-11.3410	-11.4760	1.0360
25	3.1800	2.5784	2.3042	1.5467	0.8061	0.1332	-0.2098	-0.6849	-1.1791	-1.8418	-2.2721	-2.1927	-1.3747	1.8620	-1.7157	-3.8725	-8.7433	-8.5659	-8.2062	-10.1560	1.0360
26	3.1800	2.7244	2.3535	2.1272	1.6420	1.2109	0.7185	0.4592	0.2522	0.0458	-0.1436	-0.3889	-0.2720	-0.2951	-0.0679	0.3919	1.3911	2.1366	4.7773	2.2229	-2.0393
27	1.5862	1.2490	1.0200	0.9682	0.8100	0.6584	0.3684	0.1659	0.3631	0.5093	0.3242	-0.4065	-0.1150	-0.3897	-0.9521	-1.3086	-1.3701	-1.3967	-1.9766	-2.8855	-2.6932
28	1.2642	1.0434	0.8882	0.8468	0.7339	0.6410	0.3152	0.0280	0.1689	0.4070	0.3953	0.1496	-0.1515	-0.4917	-0.8778	-1.0631	-1.2297	-1.3707	-1.7300	-1.8361	-1.4977
29	0.9074	0.7802	0.6434	0.5586	0.5106	0.5088	0.2232	-0.1046	-0.2079	-0.0164	-0.0077	-0.0447	-0.2904	-0.4620	-0.7626	-0.8658	-1.0746	-1.2815	-1.5164	-1.6407	-1.5764
30	-0.2468	-0.2819	-0.3093	-0.3545	-0.2727	-0.0445	-0.1368	-0.2941	-0.2315	-0.1492	-0.2496	-0.3076	-0.3950	-0.5947	-0.8398	-1.1312	-1.3406	-1.4471	-1.5165	-1.5515	-1.5432
31	-0.7747	-0.7534	-0.7626	-0.8007	-0.5671	-0.1992	-0.1564	-0.1730	-0.0442	-0.1384	-0.4018	-0.5906	-0.6330	-0.8202	-1.1783	-1.3504	-1.5406	-1.4928	-1.3242	-1.1464	-0.9580
32	-1.2739	-1.1771	-1.1201	-1.0773	-0.7341	-0.3834	-0.2039	-0.0917	-0.1683	-0.4223	-0.7419	-1.0254	-1.0277	-1.1057	-1.2615	-1.4437	-1.4979	-1.5244	-1.3894	-1.1906	-0.9695
33	-0.9128	-0.8689	-0.9326	-1.0150	-0.7030	-0.3296	-0.1496	-0.0926	-0.3681	-0.6449	-0.8573	-0.7774	-0.8129	-0.9593	-0.8928	-1.2211	-1.3700	-1.7704	-1.9133	-1.7852	-1.5368
34	0.4781	0.4087	0.1559	-0.2034	-0.1555	0.0145	-0.0052	-0.1334	-0.4223	-0.5972	-0.5587	-0.5168	-0.6644	-0.8395	-0.8595	-1.0523	-1.2637	-1.4942	-2.5036	-2.8550	-3.2054
35	1.5299	1.3955	1.0825	0.6228	0.4405	0.3977	0.2281	0.0032	-0.2893	-0.4260	-0.3109	-0.2878	-0.2279	-0.1418	0.0911	0.2059	-0.1809	-1.1740	-2.7037	-3.2211	-3.7935
36	2.2916	2.1768	1.8211	1.4177	1.2089	1.1699	0.8891	0.4756	0.0943	-0.1357	-0.2365	-0.1870	-0.1069	0.0719	0.1540	0.1856	0.3000	0.2080	-0.7606	-1.9699	-3.2563

Tabela P.5.15. Parametar β_{15} modela (7.14) efektivne logaritamske deformacije φ_e

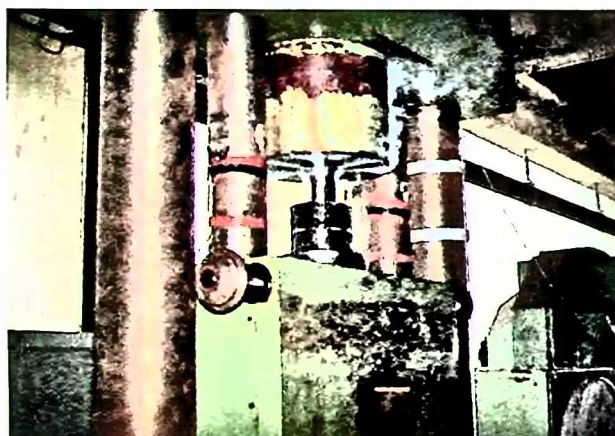
i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0.7062	0.7163	0.6987	0.6647	0.6259	0.5824	0.5381	0.5312	0.5408	0.5235	0.4566	0.4016	0.3831	0.3818	0.4265	0.5183	0.5971	0.6107	0.5541	0.4259	0.1948
2	0.3269	0.3387	0.3213	0.3063	0.2944	0.2612	0.2180	0.3170	0.4472	0.4881	0.4668	0.4152	0.3468	0.3758	0.4432	0.5118	0.4135	0.2596	0.2112	0.2327	0.2844
3	-0.1087	-0.1186	-0.1249	-0.1261	-0.1247	-0.1467	-0.1977	-0.1164	0.0787	0.1759	0.1779	0.1378	0.1304	0.1967	0.3539	0.3986	0.3877	0.4905	0.6524	0.8108	1.0420
4	-0.2337	-0.2201	-0.2207	-0.2073	-0.1900	-0.1862	-0.2183	-0.0903	0.1060	0.2275	0.2802	0.3012	0.3608	0.4411	0.4613	0.4177	0.3919	0.4226	0.4940	0.9829	1.7445
5	0.0325	0.0421	0.0556	0.0729	0.0909	0.1383	0.1235	0.2453	0.4337	0.5677	0.6523	0.6975	0.7212	0.7648	0.7474	0.6522	0.4770	0.2848	0.2032	0.3594	1.3778
6	0.2672	0.2770	0.3068	0.3532	0.3967	0.5115	0.5242	0.6472	0.8478	0.9563	1.0190	1.0687	1.1075	1.0422	0.8640	0.6661	0.5075	0.3960	0.1969	0.4039	1.4460
7	0.5249	0.5223	0.5359	0.5590	0.6009	0.7367	0.7962	0.9220	1.1295	1.2472	1.2833	1.3019	1.2513	1.0555	0.7977	0.6310	0.5174	0.3292	0.0140	-0.0733	1.3452
8	0.8544	0.8322	0.8237	0.8149	0.8240	0.9384	1.0210	1.1336	1.2988	1.3487	1.2938	1.2493	1.0221	0.7417	0.5135	0.3788	0.3192	0.1575	-0.2243	-0.1981	0.9173
9	0.9074	0.8852	0.8830	0.8840	0.9290	1.0674	1.1279	1.2169	1.3311	1.3340	1.2346	1.1104	0.9447	0.8001	0.5556	0.4045	0.2589	-0.0966	-0.3621	-0.3451	0.9531
10	0.7592	0.7659	0.7791	0.7903	0.8709	1.0107	1.0414	1.0644	1.0515	0.9188	0.7934	0.6152	0.4451	0.3499	0.3316	0.1343	-0.1422	-0.4192	-0.5121	-0.6251	0.9374
11	0.7042	0.7348	0.7755	0.8150	0.9996	0.9795	0.8580	0.7070	0.4968	0.3770	0.4825	0.4575	0.2716	0.1576	-0.3439	-0.7922	-0.9148	-0.9943	-1.3978	-0.6260	1.3776
12	0.7042	0.7550	0.7834	0.7036	0.4469	0.1906	-0.2248	-0.6888	-1.5354	-3.0822	-4.2631	-4.0201	-3.2811	-2.0399	0.7187	1.3468	1.6276	1.9413	2.2812	2.5918	3.0990
13	0.7485	0.8028	0.8132	0.5884	0.0397	-0.1956	-0.3373	-0.7637	-1.7410	-3.3214	-4.2875	-4.3105	-3.7366	-2.8411	-1.6259	0.1866	1.6454	3.1785	4.8536	6.5655	8.2745
14	1.0620	1.0678	0.9947	0.5563	-0.0685	-0.2545	-0.2444	-0.6618	-1.5375	-2.9781	-3.9884	-3.8643	-3.5015	-3.3497	-2.7027	-1.9748	-0.5596	1.3607	3.4222	5.3934	7.3636
15	1.1951	1.1386	1.0301	0.6173	-0.0470	-0.3120	-0.2650	-0.6762	-1.3171	-2.6205	-3.3121	-2.6912	-2.1477	-2.4124	-2.9446	-2.8994	-2.4732	1.1764	2.4668	4.4253	6.2882
16	1.0615	0.9439	0.7649	0.4800	-0.0054	-0.3672	-0.3972	-0.7508	-1.0821	-1.7911	-2.6913	-2.6912	-2.1477	-2.4124	-2.9446	-2.8994	-2.4732	1.1764	2.4668	4.4253	6.2882
17	1.3720	1.1824	0.8660	0.5221	0.1302	-0.2182	-0.4662	-0.7908	-1.1363	-1.4420	-1.6509	-1.8980	-1.9568	-2.0406	-2.4530	-2.9075	-2.5115	-1.6391	-0.5485	0.6123	1.8739
18	1.4855	1.1911	0.8181	0.5512	0.1978	-0.1276	-0.4324	-0.5859	-0.9554	-1.1741	-1.3112	-1.3433	-1.5179	-1.8197	-2.3080	-2.7828	-2.8289	-2.4145	-1.5060	-0.5200	0.5416
19	1.7302	1.3589	0.9129	0.6086	0.1766	-0.1863	-0.4339	-0.3722	-0.5487	-0.6644	-1.0441	-1.1204	-1.3439	-1.6693	-2.3930	-2.7402	-2.8309	-2.6480	-2.0135	-1.1595	-0.1789
20	2.4206	1.9901	1.4727	1.0349	0.5019	0.0904	-0.3026	-0.3549	-0.2845	-0.4739	-0.5905	-0.7148	-1.1418	-1.8392	-2.7034	-3.1567	-3.1087	-2.4482	-1.8766	-1.2394	-0.4513
21	2.6805	2.2600	1.7157	1.2218	0.6984	0.2927	-0.1786	-0.3804	-0.4614	-0.4937	-0.5481	-0.5476	-0.5403	-0.9944	-2.0466	-3.2267	-3.9841	-3.2830	-2.1279	-0.6776	0.6052
22	1.8865	1.4922	1.0747	0.6873	0.1824	-0.2038	-0.6271	-0.7553	-0.7121	-0.6158	-0.5363	-0.3875	-0.2822	-0.4409	-0.8249	-1.2625	-1.5510	-2.4059	-4.4229	-3.6163	0.8654
23	1.8865	1.3490	0.8457	0.1661	-0.4500	-0.9575	-1.0219	-1.0529	-1.1927	-1.7229	-2.5799	-3.3083	-4.6174	-1.3457	-0.5604	-2.0448	-3.5523	-4.1452	-5.6885	-5.8171	-5.4186
24	1.2143	0.7216	0.3375	-0.2224	-0.8327	-1.1674	-1.2006	-1.1991	-1.1625	-1.1911	-1.4422	-2.7670	-4.0162	-5.9666	-5.7458	-5.7213	-5.6820	-5.6267	-5.6148	-5.6090	-5.5971
25	0.4752	0.0383	-0.2654	-0.7944	-1.2089	-1.4319	-1.4119	-1.3855	-1.2817	-1.2735	-1.2871	-1.3617	-1.1532	-0.1388	-2.9301	-4.9862	-5.9028	-5.0265	-4.0675	-4.3735	-6.9198
26	0.4752	0.1453	-0.1519	-0.3906	-0.7777	-1.0271	-1.2223	-1.2311	-1.1746	-1.0945	-0.9501	-0.8078	-0.6592	-0.5701	-0.5066	-0.4057	-0.1026	-0.1055	0.1993	-0.9737	-2.2654
27	-0.8724	-1.1062	-1.2777	-1.3810	-1.5366	-1.6517	-1.7905	-1.8055	-1.6168	-1.4170	-1.3145	-1.2443	-1.0722	-1.0854	-1.5320	-1.9792	-2.2806	-2.4052	-2.2542	-1.7607	-0.7422
28	-1.5513	-1.7054	-1.8340	-1.9087	-1.9877	-2.0601	-2.1753	-2.2260	-2.0505	-1.7727	-1.5731	-1.4896	-1.4338	-1.3498	-1.3641	-1.3352	-1.3112	-1.3026	-1.4300	-1.4831	-1.3661
29	-2.1502	-2.2085	-2.2812	-2.3294	-2.3406	-2.3688	-2.4309	-2.4814	-2.4110	-2.1494	-1.9234	-1.7210	-1.6335	-1.5606	-1.4997	-1.2694	-1.1532	-1.1346	-1.2123	-1.2468	-1.2044
30	-2.4243	-2.4160	-2.4509	-2.4952	-2.5068	-2.5268	-2.5578	-2.5857	-2.5069	-2.3252	-2.1898	-2.0247	-1.8807	-1.8193	-1.6274	-1.4480	-1.2834	-1.1838	-1.1393	-1.0788	-1.0000
31	-2.6354	-2.6009	-2.5764	-2.5611	-2.4711	-2.3870	-2.3249	-2.3032	-2.1785	-2.1008	-2.1306	-2.1222	-2.0806	-1.9967	-1.8643	-1.6286	-1.3957	-1.1923	-0.9703	-0.7430	-0.5188
32	-2.7667	-2.6909	-2.6205	-2.5586	-2.4045	-2.2570	-2.0988	-2.0019	-1.9789	-2.0381	-2.1450	-2.2218	-2.1493	-1.9782	-1.8141	-1.7138	-1.5028	-1.3054	-1.0105	-0.6834	-0.3498
33	-2.5500	-2.5065	-2.4796	-2.4633	-2.2795	-2.0600	-1.8370	-1.7248	-1.7649	-1.8663	-1.9564	-1.8689	-1.8263	-1.7997	-1.6612	-1.7140	-1.6474	-1.4788	-1.2437	-0.8844	-0.4667
34	-1.8178	-1.8005	-1.8289	-1.9279	-1.8625	-1.7106	-1.5468	-1.4880	-1.5241	-1.5823	-1.5464	-1.4631	-1.5013	-1.5817	-1.5959	-1.6688	-1.7407	-1.5109	-1.7307	-1.6544	-1.3911
35	-1.3341	-1.3375	-1.3783	-1.5106	-1.5386	-1.4439	-1.3152	-1.2814	-1.2954	-1.3070	-1.2168	-1.1594	-1.1212	-1.0892	-0.9392	-0.8257	-0.6688	-1.0045	-1.3496	-1.9521	-1.9941
36	-1.0377	-1.0125	-1.0520	-1.1703	-1.2643	-1.1441	-1.0552	-1.0454	-1.0372	-1.0173	-0.9918	-0.9610	-0.9172	-0.7504	-0.6006	-0.5244	-0.3817	-0.2873	-0.4911	-1.4714	-2.3460



Slika P.6.1. Postavljanje priprema u alat



Slika P.6.2. Kompletiranje sklopa alata



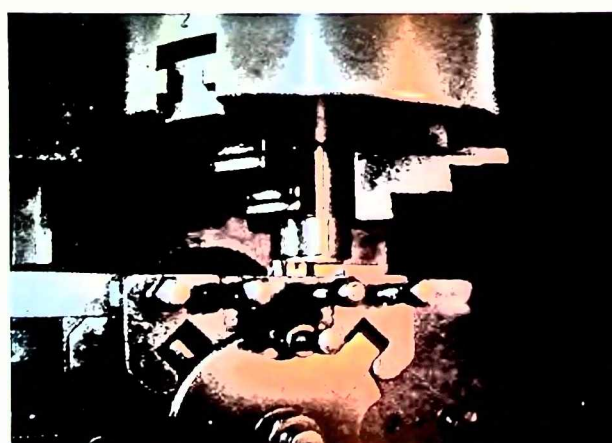
Slika P.6.3. Proces deformisanja na presi



Slika P.6.4. Deformisani obradci



Slika P.6.5. Alati za stezanje žljebastih pločica pri izradi na strugu



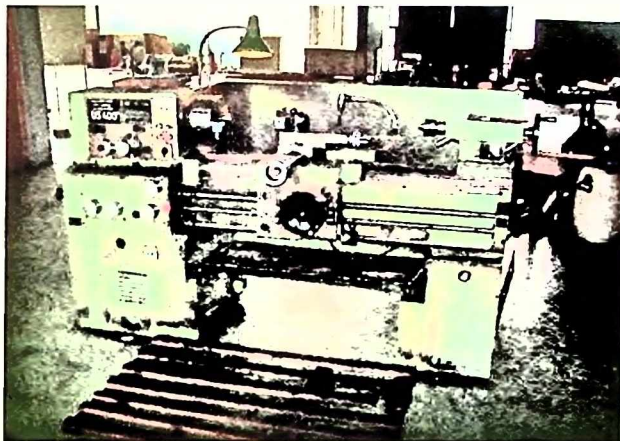
Slika P.6.6. Izrada žljebastih pločica na strugu



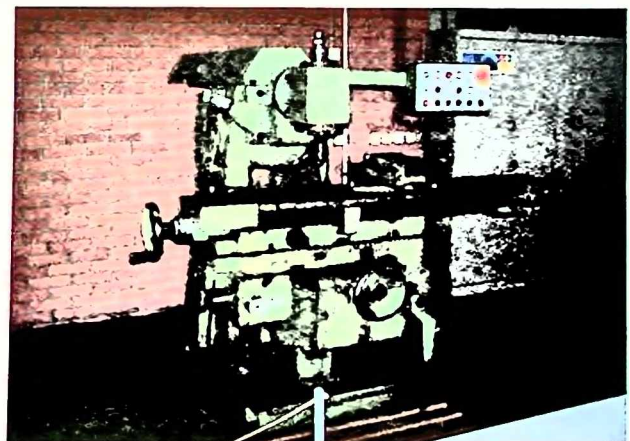
Slika P.6.7. Alati za stezanje segmentnih priprema pri obradi na konačnu mjeru



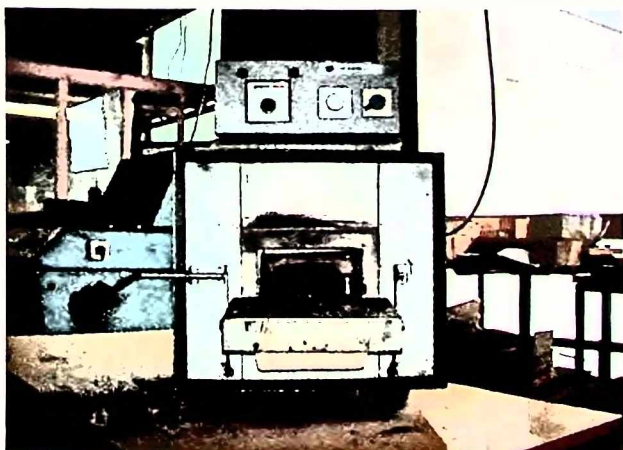
Slika P.6.8. Alati za spajanje žljebastih pločica u segmentne pripreme



Slika P.6.9. Univerzalni strug US 400



Slika P.6.10. Univerzalna glodalica FGU 32



Slika P.6.11. Laboratorijska peć LP 08



Slika P.6.12. Tračna testera UD 210

PODACI POTREBNI ZA DIGITALIZACIJU DOKTORSKE DISERTACIJE

Ime i prezime autora Mileta Janjić

Godina rođenja 1967

E-mail mileta@ac.me

Organizaciona jedinica Univerziteta Crne Gore

Mašinski fakultet

Naslov doktorske disertacije

Istraživanje naponsko deformacionih parametara u procesima zapreminskog deformisanja

Prevod naslova na engleski jezik

Stress Deformation Parameter Investigation in the Processes of the Bulk Metal Forming

Datum odbrane 05.10.2010.

Signatura u Univerzitetskoj biblioteci¹

Naslov, sažeci, ključne riječi (priložiti dokument sa podacima potrebnim za unos doktorske disertacije u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore)

Izjava o korišćenju (priložiti potpisanu izjavu)

Napomena

¹ Podatak o signaturi (lokaciji) može ispuniti biblioteka organizacione jedinice/Univerzitetska biblioteka

UNIVERZITETA CRNE GORE

Prevod naslova disertacije na engleski jezik

Stress Deformation Parameter Investigation in the Processes of the Bulk Metal Forming

Mentor i članovi komisija (za ocjenu i odbranu)

1. Prof. dr Vuko Domazetović, mentor
Red. prof. u penziji Univerziteta Crne Gore
2. Prof. dr Predrag Popović
Red. prof. u penziji Univerziteta u Nišu
3. Prof. dr Miroslav Plančak
Redovni prof. Univerziteta u Novom Sadu
4. Prof. dr Milan Vukčević
Red. prof. Univerziteta Crne Gore
5. Dr Vesna Mandić
Docent Univerziteta u Kragujevcu



Sažetak

Prilog 1.

Sažetak na engleskom (njemačkom ili francuskom) jeziku

Prolog 2.

Ključne riječi Zapreminska obrada u otvorenim kalupima, deformacija, brzina deformacije, napon, pomjeranje, brzina pomjeranja, numerička simulacija, diskretizacija, visioplastičnost

Ključne riječi na engleskom jeziku Bulk Metal Forming in Open Die, Strain, Strain Rate, Stress, Displacement, Velocity of Displacement, Numerical Simulacion, Discretization, Visioplasccticity

Naučna oblast/uža naučna oblast

Mašinstvo - Obrada metala deformisanjem

Naučna oblast/uža naučna oblast na engleskom jeziku

Mechanical engineering - Metal forming

Ostali podaci

* Ukoliko je predviđeni prostor za polja Sažetak, Sažetak na engleskom jeziku, Ključne riječi i Ključne riječi na engleskom jeziku nedovoljan, pr ih u posebnom prilogu.

Prilog 1.

Sažetak

Disertacija obuhvata analizu naponsko deformacionih parametara procesa deformisanja u otvorenim kalupima osnosimetričnih obradaka. Analiza obuhvata određivanje promjene svih komponenata deformacija, brzina deformacija i napona u meridijalnom presjeku obradka, na osnovu određene promjene pomjeranja tačaka presjeka. U tu svrhu izvedena su obimna eksperimentalna istraživanja, uz korišćenje poznatih i priznatih naučnih metoda i razvoja novih. Takođe su izvršene numeričke simulacije pomoću DEFORM softverskog paketa, kao jednog od paketa za metod konačnih elemenata.

Eksperimentalna istraživanja izvršena su korišćenjem realnog materijala - legure aluminijuma AlMgSi0,5 domaće proizvodnje, za usvojenu klasu stepenastih osnosimetričnih djelova. Ispitivanje se vrši u Laboratoriji Instituta Mašinskog fakulteta u Podgorici, gdje su ostali uslovi istraživanja, u skladu sa objektivnim mogućnostima, podešeni tako da su što približniji realnim uslovima koji vladaju u proizvodnji. Ispitivanje se vrši na temperaturama tople obrade u intervalu $t=(420\div 460)$ [°C], pri deformisanju na presi sa konstantnom brzinom deformisanja: $v=2$ [mm/s] i podmazivanjem grafitnom mašću.

Kao ulazni parametri posmatraju se: osnovni geometrijski parametri kalupa i priprema (definisani u obliku odnosa dimenzija kalupa i osnovnog prečnika kalupa, radi mogućnosti generalizovanja dobijenih rezultata) i termomehanički parametri (temperatura, stepen deformacije, koeficijent trenja, napon tečenja).

Eksperiment je organizovan saglasno višefaktornom ortogonalnom planu sa variranjem faktora na dva nivoa varijacije i ponavljanjem u centralnoj tački plana. Za izvođenje eksperimentalnih istraživanja razvijeni su i izrađeni odgovarajući alati za pripremu materijala procesom istosmjernog istiskivanja, slobodno sabijanje i deformisanje u otvorenim kalupima. Kalupi predstavljaju kombinaciju pločastih segmenata odgovarajućih dimenzija i kreću se u cjevastoj vodiči, koja istovremeno služi kao komora za održanje izoternosti procesa.

U cilju određivanja pomjeranja tačaka meridijalnog presjeka obradka kao osnove za određivanje naponsko deformacionih parametara, razvijeni su segmentni pripremači od žljebastih pločica. Kod ovakvih pripremača, odgovarajućom obradom koja se sastoji od skidanja jedne polovine obradka do ose simetrije, finog poliranja i nagrizanja 10% rastvorom NaOH, golim okom se uočava jasno izražena mreža kontura žljebastih pločica, pogodna za digitalizaciju i dalju računarsku obradu. Metod je nazvan metodom fizičke diskretizacije, s obzirom da su u pitanju fizički diskretizovani pripremači.

Najvažniji ulazni faktor za određivanje naponskih komponenata i u numeričkim simulacijama i fizičkom modeliranju jeste napon tečenja, pa je izvršeno određivanje krivih ojačavanja korišćenjem više različitih metoda za konkretne uslove istraživanja. Regresionom analizom krivih ojačavanja dobijeni su visokokorelativni modeli oblika stepene funkcije, kao i ekvivalentne krive ojačavanja, koje predstavljaju srednje vrijednosti krivih dobijenih različitim metodima. Analiza dobijenih krivih ojačavanja i njihovih modela, urađena je na osnovu uporedenja eksperimentalno dobijene deformacione sile i sila dobijenih DEFORM simulacijom za različite krive ojačavanja. Kako je drugi važan ulazni faktor kontakno trenje, izvršeno je određivanje koeficijenta/faktora trenja za konkretne uslove istraživanja. Korišćena je eksperimentalna metoda sabijanja prstena (*Ring Test*) i više kalibracionih dijagrama po raznim autorima. Dobijeni su i kalibracioni dijagrami DEFORM simulacijom i izvršena je analiza svih rezultata. Kao materijal za ispitivanje, pored osnovnog materijala - legure aluminijuma,

korišćeno je i olovo kao materijal koji dobro modelira tečenje aluminijuma u toplom stanju, što je potvrđeno analizom dobijenih rezultata.

Polazna osnova za analizu je dobijena digitalizovana slika meridijalnog presjeka sa mrežom deformisanih kontura žljebastih pločica. Parametri deformacija se dobijaju na osnovu pomjeranja čvornih tačaka mreže. Kinematski parametri, zbog nestacionarnosti procesa, određuju se na osnovu brzina pomjeranja u posmatranom vremenskom intervalu, pa je neophodno odrediti pomjeranja na početku intervala. Naponski parametri su određeni metodom visioplastičnosti. Takođe su dobijeni svi naponsko deformacioni parametri numeričkom DEFORM simulacijom.

Analizom i poređenjem svih naponsko deformacionih parametara, dobijenih metodom fizičke diskretizacije i DEFORM simulacijom, dobijen je veliki broj zaključaka koji se odnose na distribuciju parametara u meridijalnoj ravni obradka. Detaljnim poznavanjem svih parametara procesa zapreminskog deformisanja stvaraju se mogućnosti odgovora na sve strožije zahtjeve u pogledu kvaliteta poroizvoda, postojanosti alata i iskorišćenja proizvodnih resursa.

Prilog 2.

Sažetak na engleskom jeziku

The paper comprises an analysis of the stress deformation parameter processes in open die of axial-symmetrical workpieces. The analysis includes a determination of the change in all strain components, strain rate and stress in meridial cross-section of a workpiece, based on a certain change of the cross-section point displacement. To this purpose detailed experiments have been carried out, using known and acknowledged scientific methods and developing software package, as one of those for the method of finite elements, have also been carried out.

Experimental investigations were carried out by using real material-aluminum alloys AlMgSi 0.5 of home production, for the accepted class of step down axial-symmetrical pieces. The investigation is performed in the laboratory of the Institute of the Faculty of Mechanical Engineering in Podgorica, where other investigation conditions, in accordance with objective possibilities, are adapted in a way to be as much more approximate to real conditions present in production. The investigation is done at the temperatures of thermal for forming within interval of $t=(420\div 460)$ [°C], at deformation on the press at a constant strain rate: $v=2$ [mm/s], and by graphite grease lubrication.

Input parameters observed are: basic die and preparation piece geometrical parameters (defined in the form of relations of the die and basic die diameter, in order to generalize the results obtained) and parameters (temperature, strain degree, friction coefficient, stress yield).

The experiment is organized in accordance with a modern multi-factor orthogonal plan with varying factors on two variation levels and by repeating in the central plan point. For performing experimental investigations there were developed and made corresponding tools to prepare material by the process of one-direction extrusion, free compression and deformation in open dies. The dies represent a combination of plate segments of corresponding dimensions and they move in a tube guide, serving at the same time as a chamber for maintaining process isothermity.

To determine point displacement of the workpiece meridial cross-section as a base for stress-strain parameter determination, there were developed segmental preparation pieces made of groove plates. With these pieces, by an adequate forming consisting of cutting a half of a workpiece to its symmetry axis, fine polishing and biting by 10% NaOH solution, it is possible to notice a clearly expressed network of the groove plate contours, suitable for digitalization and further computerization.

This most important factor for determining stress components both in numerical simulations and physical modelling is stress yield, thus a determination of strengthening curves using several different methods for concrete investigation conditions was made. By a regression analysis of the strengthening curves there have been obtained highly correlative step function form models, as well as equivalent strengthening curves, representing mean values of the curves obtained by various methods. The analysis of the obtained strengthening curves and their models was done on the base of comparing an experimentally obtained strain force and forced achieved by DEFORM simulation for various strengthening curves. As the second important input factor is contact friction, there has been determined a friction coefficient/factor for the concrete investigation conditions. There was used an experimental Ring Test and several caliber diagrams by various authors. There have been obtained caliber diagrams by DEFORM simulation and all the results have been analyzed. As an investigation material, apart from the basic one-aluminium alloy, suitable for a good modelling of hot aluminium yield, this being proved by analyzing the results obtained.

A starting base for the analysis is an obtained digitalized image of the meridial cross - section with the net of the deformed groove plate contours. Strain parameters are obtained on the base of displacing nod net points. Kinematics parameters, as the process is not stationary, are determined on the base of displacement velocity in the observed time interval, so it is necessary to determine a displacement at the beginning of an interval. Stress parameters have been determined by the method visioplasticity. There have also been obtained all stress and strain parameters by the numerical DEFORM simulation.

By analyzing and comparing all stress and strain parameters, obtained by the method of physical discretization and DEFORM simulation, there has been achieved a great number of conclusions referring to parameter distribution in meridial workpiece plane. By a detailed knowledge of all the parameters of the bulk metal forming process, there have been made possibilities to meet more strict demands as for product quality, tool stability and production resource utilization.

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore unese doktorsku disertaciju pod naslovom

koja je moj autorski rad.

Doktorska disertacija, pohranjena u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore, može se koristiti pod uslovima definisanim licencom Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio/la¹.

☐
☐
☐
☐
☒
☐

Autorstvo

Autorstvo – bez prerada

Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

Autorstvo – nekomercijalno

Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada

Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima

Potpis doktoranda



U Podgorici

09/07/2018

¹ Odabrati (čekirati) jednu od šest ponuđenih licenci (kratak opis licenci dat je na poledini ovog priloga)

Autorstvo

Licenca sa najširim obimom prava korišćenja. Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio).

Djelo se može koristiti i u komercijalne svrhe.

Autorstvo – bez prerada

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu.

Licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerade se moraju distribuirati pod istom ili sličnom licencom.

Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.

Autorstvo – nekomercijalno

Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio).

Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.

Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada

Licenca kojom se u najvećoj mjeri ograničavaju prava korišćenja djela. Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu.

Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.

Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija, javno saopštavanje i prerada djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerada se mora distribuirati pod istom ili sličnom licencom.

Djelo i prerade se ne mogu koristiti u komercijalne svrhe.