



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Aljoša Ivanišević

**MONOTONI PROCESI DEFORMISANJA PRI
HLADNOM ZAPREMINSKOM OBLIKOVANJU I
NJIHOVA PRIMENA ZA ODREĐIVANJE
DIJAGRAMA GRANIČNE DEFORMABILNOSTI**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor:
Prof. dr Dragiša Vilotić

Novi Sad,
2018.



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

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Аљоша Иванишевић, мастер инжењер машинства
Ментор, МН:	Др Драгиша Вилотић, редовни професор
Наслов рада, НР:	Монотони процеси деформисања при хладном запреминском обликовању и њихова примена за одређивање дијаграма граничне деформабилности
Језик публикације, ЈП:	Српски
Језик извода, ЈИ:	Српски/Енглески
Земља публикавања, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УГП:	АП Војводина
Година, ГО:	2018.
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6
Физички опис рада, ФО: <small>(поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)</small>	11/182/78/108/171/0/0
Научна област, НО:	Машинско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Технологије обраде деформисањем
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Деформабилност материјала, показатељ напонско стања, дијаграм граничне деформабилности, монотони процеси деформисања
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука, Нови Сад
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	Истраживања приказана у дисертацији имала су за циљ развој монотоних модела деформисања у циљу њихове примене за одређивање дијаграма граничне деформабилности. Комбинацијом различитих геометрија узорака, геометрије алата и триболошких услова развијени су монотони модели деформисања који су промењени за одређивање дијаграма граничне деформабилности.
Датум прихватања теме, ДП:	08.05.2014
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: Др Бранко Шкорић, редовни професор
	Члан: Др Саша Ранђеловић, редовни професор
	Члан: Др Милија Краишник, доцент
	Члан: Др Младомир Милутиновић, доцент
	Члан: Др Дејан Моврин, доцент
	Члан, ментор: Др Драгиша Вилотић, редовни професор
	Потпис ментора



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

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual material, printed
Contents code, CC :	Doctoral Thesis
Author, AU :	Aljoša Ivanišević, master in Mechanical engineering
Mentor, MN :	Dragiša Vilotić, PhD, full professor
Title, TI :	Monotonic forming processes in cold forming and application for determination of forming limit diagram
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian/English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	AP Vojvodina
Publication year, PY :	2018.
Publisher, PB :	Authors reprint
Publication place, PP :	Novi Sad, Serbia
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	11/182/78/108/171/0/0
Scientific field, SF :	Mechanical Engineering
Scientific discipline, SD :	Forming technologies
Subject/Key words, S/KW :	Material formability, stress ratio, forming limit diagram, monotonic forming processes
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences
Note, N :	
Abstract, AB :	Research presented in this dissertation was conducted in order to develop monotonic forming processes suitable for determination of forming limit diagram. Combining different geometries of billets as well as tools and friction conditions monotonic models are developed and applied for determination of forming limit diagram.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	08.05.2014
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	
President:	Branko Škorić, PhD, full professor
Member:	Saša Randelović, PhD, full professor
Member:	Milija Krašnik, PhD, assistant professor
Member:	Mladimir Milutinović, PhD, assistant professor
Member:	Dejan Movrin, PhD, assistant professor
Member, Mentor:	Dragiša Vilotić, PhD, full professor

Mentor's sign

Mojoj porodici

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA DEFORMABILNOSTI MATERIJALA, PREDMET I CILJ ISTRAŽIVANJA	5
2.1. DEFORMABILNOST MATERIJALA.....	5
2.2. METODOLOGIJA ODREĐIVANJA DGD-a	10
2.3. PRIMENA RAZLIČITIH MODELA DEFORMISANJA ZA ODREĐIVANJE DGD-a.....	15
2.4. PRIMENA NUMERIČKIH SIMULACIJA U OBLASTI DEFORMABILNOSTI MATERIJALA..	21
3. IDENTIFIKACIJA POKAZATELJA NAPONSKOG STANJA	25
3.1. MONOTONI PROCESI DEFORMISANJA	25
3.2. POKAZATELJ NAPONSKOG STANJA KOD MONOTONIH PROCESA DEFORMISANJA	27
3.2.1. JEDNOOSNO SABIJANJE	27
3.2.2. JEDNOOSNO ZATEZANJE.....	28
3.2.3. ČISTO UVIJANJE.....	29
3.2.4. RAVNOMERNO DVOOSNO ZATEZANJE	29
3.2.5. RAVNOMERNO DVOOSNO SABIJANJE	30
3.2.6. DEFORMISANJE TANKOZIDNE CEVI	31
3.3. POKAZATELJ NAPONSKOG STANJA U PROCESIMA SLOBODNOG SABIJANJA VALJKA ALATIMA RAZLIČITIH OBLIKA	32
3.4. POKAZATELJ NAPONSKOG STANJA ZA POJEDINE TEHNOLOŠKE METODE OBRADE DEFORMISANJEM	37
3.5. ISTORIJA POKAZATELJA NAPONSKOG STANJA.....	39
3.6. UTICAJ ISTORIJE POKAZATELJA NAPONSKOG STANJA NA DEFORMABILNOST MATERIJALA	47
3.7. CILJ ISTRAŽIVANJA	48
4. HIPOTEZA, KONCEPCIJA I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	50
4.1. HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA.....	50
4.2. KONCEPCIJA ISTRAŽIVANJA	50
4.3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA.....	51
4.4. IZBOR GEOMETRIJE UZORKA	53
4.5. MAŠINA, ALAT I OPREMA KORIŠĆENI ZA EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA	66
5. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA	68
5.1. ODREĐIVANJE KRIVE TEČENJA MATERIJALA C45E	68

5.2. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE MONOTONIH PROCESA DEFORMISANJA.....	71
5.2.1. SABIJANJE UZORAKA GRUPE R_L RAVNIM ALATIMA	71
5.2.2. SABIJANJE UZORAKA GRUPE C_L RAVNIM ALATIMA	77
5.2.3. SABIJANJE UZORAKA GRUPE C_Z RAVNIM ALATIMA	83
5.2.4. SABIJANJE UZORAKA GRUPE CO_KRA RAVNIM I KONUSNIM ALATIMA	88
5.2.5. SABIJANJE UZORAKA GRUPE C_3D RAVNIM ALATIMA	94
5.3. ISTORIJA POKAZATELJA NAPONSKOG STANJA PRIKAZANIH MODELA DEFORMISANJA I POLOŽAJ NA DGD-u.....	100
5.3.1. GRUPA UZORAKA R_L	100
5.3.2. GRUPA UZORAKA C_L	101
5.3.3. GRUPA UZORAKA C_Z	102
5.3.4. GRUPA UZORAKA CO_KRA	103
5.3.5. GRUPA UZORAKA C_3D	104
5.4. KONSTRUKCIJA DIJAGRAMA GRANIČNE DEFORMABILNOSTI PRIMENOM MONOTONIH MODELA DEFORMISANJA	106
6. PRIMENA METODE KONAČNIH ELEMENATA U ANALIZI DEFORMABILNOSTI MATERIJALA.....	108
6.1. OSNOVE METODE KONAČNIH ELEMENATA	108
6.2. FORMIRANJE MODELA PRIMENOM METODE KONAČNIH ELEMENATA.....	111
6.2.1. DISKRETIZACIJA DOMENA	111
6.2.2. IZBOR KONAČNIH ELEMENATA	111
6.2.3. GENERISANJE MREŽE KONAČNIH ELEMENATA	112
6.2.4. KONTAKTNO TRENJE	113
6.2.5. IZBOR MATERIJALA	113
6.3. NUMERIČKA ANALIZA SABIJANJA MONOTONIH MODELA DEFORMISANJA.....	114
6.4. MODELOVANJE ALATA	115
6.5. MODELOVANJE TRIBOLOŠKUH USLOVA.....	116
6.6. MODELOVANJE MATERIJALA UZORKA.....	116
6.7. KREIRANJE MREŽE KONAČNIH ELEMENATA.....	117
6.8. MODELOVANJE MAŠINE I USLOVA OBRADE.....	118
6.9. REZULTATI NUMERIČKE ANALIZE.....	118
6.9.1. NUMERIČKA ANALIZA SABIJANJA UZORAKA GRUPE R_L RAVNIM ALATIMA	119
6.9.2. NUMERIČKA ANALIZA SABIJANJA UZORAKA GRUPE C_L RAVNIM ALATIMA	126
6.9.3. NUMERIČKA ANALIZA SABIJANJA UZORAKA GRUPE C_Z RAVNIM ALATIMA	133
6.9.4. NUMERIČKA ANALIZA SABIJANJA UZORAKA GRUPE CO_KRA RAVNIM I KONUSNIM ALATIMA	140

6.9.5. NUMERIČKA ANALIZA SABIJANJA UZORAKA GRUPE C_3D RAVNIM ALATIMA	147
7. UPOREDNI PRIKAZ REZULTATA DEFORMABILNOSTI MATERIJALA OSTVARENIH EKSPERIMENTALNO I NUMERIČKOM SIMULACIJOM	154
7.1. SABIJANJE UZORAKA GRUPE R_L RAVNIM ALATIMA	154
7.2. SABIJANJE UZORAKA GRUPE C_L RAVNIM ALATIMA.....	157
7.3. SABIJANJE UZORAKA GRUPE C_Z RAVNIM ALATIMA.....	159
7.4. SABIJANJE UZORAKA GRUPE CO_KRA RAVNIM I KONUSNIM ALATIMA.....	161
7.5. SABIJANJE UZORAKA GRUPE C_3D RAVNIM ALATIMA	163
7.6. POLOŽAJ MODELA DEFORMACIJE NA DIJAGRAMU GRANIČNE DEFORMABILNOSTI	165
8. DISKUSIJA REZULTATA	166
8.1. UTICAJ GEOMETRIJE UZORKA I ALATA NA POKAZATELJ NAPONSKOG STANJA	166
8.2. PRIMENA SIMULACIJA ZA ODREĐIVANJE ISTORIJE DEFORMISANJA.....	169
8.3. DIJAGRAM GRANIČNE DEFORMABILNOSTI ZA ČELIK C45E	171
9. ZAKLJUČAK	174
10. NAUČNI DOPRINOS I MOGUĆNOST PRIMENE REZULTATA U PRAKSI.....	176
11. LITERATURA	177

REZIME

Deformabilnost materijala predstavlja sposobnost materijala da se deformiše bez pojave oštećenja mikrostrukture. Pored toga, deformabilnost materijala je limitirajući faktor primene tehnologije plastičnog deformisanja, kako u hladnom tako i u toplom stanju.

Grafičku interpretaciju deformabilnosti materijala predstavlja dijagram granične deformabilnosti (DGD) za čije određivanje je potrebno primeniti eksperimentalna ispitivanja različitih modela deformisanja. S obzirom da se deformisanjem uzorka do pojave oštećenja dobija samo jedna tačka u dijagramu granične deformabilnosti, za detaljnije određivanje krive mora se izvršiti niz eksperimenata s različitim modelima deformisanja.

S obzirom da na naponsko stanje koje postoji u radnom komadu tokom deformisanja, osim oblika alata i kontaktnih uslova, utiče i polazni oblik, tj. geometrija priprema, istraživanja prikazana u ovoj disertaciji su imala za cilj pronalaženje monotonih modela deformisanja kombinacijom geometrije priprema i alata u procesima slobodnog sabijanja. Za ispitivanje monotonosti primenjena je teorijsko-eksperimentalna metoda kao i metoda numeričke simulacije (MKE). Istraživanje prikazano u disertaciji je sprovedeno na pet monotonih modela deformisanja koji su iskorišćeni za definisanje dijagrama granične deformabilnosti za materijal C45E (Č1531) u oblasti pokazatelja naponskog stanja koja obuhvati vrednosti od -1,09 do +1,27.

Naučni doprinos postignut istraživanjima prikazanim u ovoj disertaciji predstavlja razvoj metodologije za identifikaciju monotonih modela deformisanja kao i njihovu primenu za određivanje dijagrama granične deformabilnosti. Modeli razvijeni u ovoj disertaciji se mogu koristiti kao preporučeni uzorci za definisanje dijagrama granične deformabilnosti za različite materijale. Samim tim, pored naučnog doprinosa, razvoj monotonih modela deformisanja ima i praktičnu primenu usmerenu ka pojednostavljivanju metodologije određivanja dijagrama granične deformabilnosti.

Ključne reči: Deformabilnost materijala, dijagram granične deformabilnosti, monotoni procesi deformisanja

SUMMARY

Material formability represents material capability to deform without micro structural damages. Besides that, material formability is a limiting factor to application of cold and hot forming technologies.

Graphical interpretation of material formability is forming limit diagram (FLD). To determine FLD it is necessary to do an experimental research of different forming models. Due to the fact that billet deformation up to the cracking point brings about only one point in forming limit diagram, it is necessary to conduct a number of experiments to determine detailed forming limit diagram on different forming models.

Since stress state in work piece during deformation is influenced by tool shape and contact conditions as well as initial geometry, research presented in this dissertation was conducted with purpose of finding monotonous forming processes by combining various billet and tool geometries. For that purpose theoretical-experimental and numerical method (FME) were applied. Research presented in the dissertation was conducted on five monotonous forming models which are used for determination of forming limit diagram for steel C45E in area of stress state indicator from -1,09 to +1,27.

Scientific contribution achieved by the research presented in this dissertation represents development of methodology for identification of monotonous forming processes as well as their application for determination of forming limit diagram. Models presented in this dissertation can be used as recommended billets for determination of forming limit diagram for various materials. Besides scientific contribution, models developed in this dissertation have also practical application directed to simplification of forming limit diagram determination methodology.

Key words: Material formability, forming limit diagram, monotonous forming processes

ZUSAMMENFASSUNG

Formänderungsvermögen des Materials steht für die Fähigkeit des Materials, sich ohne mikrostrukturelle Schäden zu verformen. Darüber hinaus ist das Formänderungsvermögen des Materials ein limitierender Faktor für die Anwendung von Kalt- und Warmumformtechnologien.

Das Grenzformänderungsschaubild ist grafische Interpretation von Formänderungsvermögen des Materials. Um FLD zu bestimmen, ist eine experimentelle Untersuchung verschiedener Umformungsmodelle erforderlich. Mit der Deformation eines Modells ist nur ein Punkt im Grenzformänderungsschaubild erhalten. Deswegen müssen viele unterschiedlichen Umformmodellen benutzt werden, um das Grenzformänderungsschaubild besser festzustellen zu können.

Da der Spannungszustand im Werkstück während der Verformung durch Werkzeugform und Kontaktbedingungen sowie die Anfangsgeometrie beeinflusst wird, wurde die in dieser Dissertation vorgestellte Arbeit mit dem Ziel durchgeführt, monotone Umformprozesse durch Kombination verschiedener Block- und Werkzeuggeometrien zu finden. Zu diesem Zweck wurden theoretisch-experimentelle und numerische Methoden (FME) angewendet. Die in der Dissertation vorgestellten Arbeiten wurden an fünf monotonen Umformungsmodellen durchgeführt, die zur Bestimmung des Grenzformänderungsschaubild für Stahl C45E im Bereich des Spannungszustandsindikators von -1,09 bis +1,27 verwendet werden.

Der wissenschaftliche Beitrag der vorliegenden Dissertation stellt die Entwicklung von Methoden zur Identifizierung von monotonen Umformprozessen sowie deren Anwendung zur Bestimmung des Grenzformänderungsschaubild dar. Die in dieser Dissertation vorgestellten Modelle können als empfohlene Modellen für Bestimmung von dem Grenzformänderungsschaubild für verschiedene Materialien benutzen werden. Neben dem wissenschaftlichen Beitrag haben die in dieser Dissertation entwickelten Modelle auch eine praktische Anwendung, die auf die Vereinfachung der Methode zur Bestimmung des Grenzformationsdiagramms gerichtet ist.

Schlüsselwörter: Formänderungsvermögen des Materials, das Grenzformänderungsschaubild, monoton Formungsprozess

1. UVOD

Jedno od glavnih obeležja vremena koje je iza nas predstavlja izuzetno brz razvoj nauke i tehnike. Posledica toga su novi standardi, kriterijumi poslovanja kao i sve veća i agresivnija konkurencija koja vlada između industrijskih proizvođača, a u cilju borbe za tržište. Zato je danas preduslov za uspešno poslovanje niska cena proizvoda kao i zadovoljavajući kvalitet istih. Pored toga, neophodno je da proizvodi imaju odgovarajući estetski izgled, funkcionalnost i pouzdanost, a da ne zagađuju životnu sredinu. Kako bi proizvođači obezbedili ove uslove pri nepredvidivom rastu cena energenata, neophodno je iznalaženje novih i usavršavanje postojećih tehnologija.

Promene koje su usledile u poslednjih nekoliko godina se najviše odnose na optimizaciju proizvodnje, najčešće smanjenjem manuelnog rada čoveka i potrošnjom energenata. Zbog toga se sve više vremena posvećuje razvoju novih i poboljšanju već postojećih tehnologija. Njihovom modifikacijom moguće je značajno smanjiti vreme izrade proizvoda, a utrošak energenata svesti na minimum.

U tom pogledu, jedno od najznačajnijih mesta u proizvodnji delova od različitih metalnih materijala, kao već potvrđenoj visokoproduktivnoj tehnologiji, pripada tehnologiji plastičnog deformisanja. Iako su metode plastičnog deformisanja, u nekom svom primitivnom obliku, korišćene još od samog nastanka civilizacije, resursi tehnologije plastičnog deformisanja u pogledu racionalizacije proizvoda, potrošnje energije i ostvarivog kvaliteta nisu još uvek u potpunosti istraženi i iskorišćeni. Razvojem novih tehnoloških metoda, primenom novih materijala, automatizacijom proizvodnje kao i primenom informacionih tehnologija ostvaruju se nove mogućnosti za njenu intenzivniju primenu [24]. Prema podacima iz literature više od 80% metalnih materijala u toku proizvodnje u nekoj fazi biva podvrgnuto jednom od tehnoloških postupaka plastičnog deformisanja [50].

Svakodnevno insistiranje tržišta na proizvodnji jeftinijih, a pri tome kvalitetnih proizvoda, zahteva od obrade deformisanjem maksimalno korišćenje deformabilnosti posmatranog materijala. Takođe, teži se pronalaženju uslova obrade pri kojima je moguće vršiti i obradu teško deformabilnih materijala. Istraživanje deformabilnosti materijala kod zapreminskog deformisanja, kako u hladnom tako i u toplom stanju, imaju za cilj širenje primene ove obrade na složene oblike obradaka, koji se izrađuju od teško deformabilnih materijala, tj. od materijala koji imaju niska polazna plastična svojstva. Poznavanje granične deformabilnosti materijala

omogućuje projektovanje tehnološkog procesa obrade s minimalnim brojem faza ili operacija obrade, što omogućuje smanjenje ukupnih troškova proizvodnje.

Ispitivanje deformabilnosti materijala se može izučavati s više aspekata, ali u disertaciji akcentat je stavljen na ispitivanje deformabilnosti s mehaničkog aspekta, odnosno na mogućnost ostvarivanja maksimalne deformacije materijala u uslovima monotonog naponsko-deformacionog stanja. Obradivost materijala deformisanjem ili deformabilnost predstavlja sposobnost materijala da se pod dejstvom opterećenja trajno deformiše, a da pri tome ne dođe do oštećenja strukture. Deformabilnost materijala zavisi od vrste, odnosno hemijskog sastava materijala, strukture, temperature obrade, brzine deformisanja i naponskog stanja [60].

Deformabilnost materijala predstavlja limitirajući faktor primene tehnologije plastičnog deformisanja, kako u hladnom tako i u toplom stanju. S povećanjem korišćenja potencijala deformabilnosti materijala moguće je smanjiti broj faza obrade, broj operacija izrade, što direktno utiče na smanjenje troškova obrade a samim tim i na nižu krajnju cenu gotovog proizvoda. Drugim rečima, za vrednost maksimalno mogućeg stepena deformacije nekog materijala bitno je poznavati naponsko stanje koje se javlja u toku obrade. Čak i krti materijali mogu uspešno plastično da se deformišu ako se izlože dovoljno velikom svestranom pritisku. Suštinski problem izučavanja deformabilnosti materijala predstavlja prognoziranje kraja procesa deformisanja, odnosno predviđanja pri kojoj deformaciji dolazi do oštećenja mikrostrukture materijala.

Grafičku interpretaciju deformabilnosti materijala predstavlja dijagram granične deformabilnosti (DGD). Za određivanje krive granične deformabilnosti potrebno je primeniti eksperimentalna istraživanja različitih modela deformisanja. Deformisanjem uzorka do pojave oštećenja, pri određenim uslovima obrade, dobija se samo jedna tačka u dijagramu granične deformabilnosti. Da bi se dobila kompletna kriva granične deformabilnosti, mora se izvršiti niz eksperimenata s različitim modelima deformisanja kojima se određuju tačke na dijagramu granične deformabilnosti za koje su vrednosti pokazatelja naponskog stanja poznate. Potrebno je naglasiti da se granična deformacija i pokazatelj naponskog stanja utvrđuju na mestu nastajanja oštećenja strukture materijala.

Za određivanje dijagrama granične deformabilnosti u osnovi se koriste jednostavni modeli deformisanja kod kojih je prisutno monotono deformisanje, a pri tome je lako utvrditi naponsko-deformaciono stanje.

Istraživanja prezentovana u disertaciji se odnose na problematiku deformabilnosti materijala u uslovima hladnog zapreminskog oblikovanja metala. Cilj istraživanja je pronalaženje monotonih procesa (modela) deformisanja pri hladnoj zapreminskoj obradi i njihova primena za određivanje dijagrama granične deformabilnosti. Pored značajnog uticaja osnovnog oblika alata, na naponsko stanje u zoni deformisanja takođe utiče i geometrija priprema. Cilj je da se kombinacijom geometrije priprema varira naponsko stanje tokom obrade, odnosno da se definiše takva geometrija priprema koja će omogućiti ispunjavanje uslova monotonosti procesa i na taj način prikupi što više podataka za definisanje krive granične deformabilnosti. Pored definisanja dijagrama granične deformabilnosti korišćenjem novih, monotonih procesa deformisanja, kroz istraživanja prikazana u disertaciji je proverena i mogućnosti analize deformabilnosti materijala primenom komercijalnog softvera za simulacije procesa deformisanja. U tu svrhu korišćen je SimufactForming programski paket.

Celokupna eksperimentalna istraživanja izvršena su u Laboratoriji za deformisanje na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Materijal na kom su vršena ispitivanja je konstrukcioni čelik za poboljšanje C45E (Č1531) u meko žarenom stanju. Ovaj materijal je odabran jer su u okviru laboratorije za deformisanje sprovedena mnogobrojna istraživanja na ovom materijalu. Prikaz realizacije ciljeva zadatih u disertaciji opisan je kroz deset celina datih kroz poglavlja disertacije.

Uvodne napomene u vezi s problematikom i tematikom rada date su u prvom poglavlju.

U drugom delu rada je objašnjen pojam deformabilnosti materijala i prikazani su uticajni faktori na deformabilnost. Potom je dat osvrt na istraživanja u polju deformabilnosti materijala. Prikazane su metode određivanja dijagrama granične deformabilnosti kao i različiti modeli deformisanja koji se koriste za definisanje dijagrama granične deformabilnosti. Na samom kraju ovog poglavlja dat je kratak uvid u primenu numeričkih simulacija u oblasti deformabilnosti materijala.

Treći deo rada daje uvid u identifikaciju pokazatelja naponskog stanja. U ovom delu su objašnjeni monotoni procesi deformisanja, navedeni uticajni faktori koji određuju da li će proces deformisanja biti monoton ili ne. Obradeno je šest osnovnih modela deformisanja i to: jednoosno sabijanje, jednoosno zatezanje, čisto uvijanje, ravnomerno dvoosno zatezanje, ravnomerno dvoosno sabijanje i deformisanje tankozidne cevi. Takođe, kroz pregled literature je izvršena analiza pokazatelja naponskog stanja u procesima slobodnog sabijanja valjka alatima različitih oblika kao i istorija pokazatelja naponskog stanja. Obrazložen je i uticaj istorije pokazatelja naponskog stanja na deformabilnost materijala. Na kraju ovog dela rada predstavljen je i cilj istraživanja doktorske disertacije.

Hipoteza disertacije i koncepcija sprovedenih istraživanja su navedeni u četvrtom poglavlju. U sklopu koncepcije istraživanja je data mikrostrukturalna i hemijska analiza materijala na kom su istraživanja vršena. Kroz ovo poglavlje je prikazana i metodologija istraživanja. Prikazani su modeli deformisanja koju su eksperimentalno istraživani kao i princip proračuna potrebnih parametara. Na kraju ovog poglavlja je dat prikaz opreme koja je korišćena u eksperimentalnim istraživanjima.

Peti deo rada predstavlja eksperimentalna istraživanja u cilju pronalaženja novih modela deformisanja kod kojih u toku procesa pokazatelj naponskog stanja ostaje nepromenjen (monotoni procesi). Za definisanje takvih procesa kao i definisanje granične deformacije i pokazatelja naponskog stanja korišćena je metodologija prikazana u četvrtom poglavlju. Eksperimentalni rezultati su prezentovani u vidu dijagrama i tabela.

U disertaciji je pored eksperimentalne analize vršena i numerička analiza metodom konačnih elemenata. Teorijske osnove metode konačnih elemenata su prikazane u šestom poglavlju. U ovom delu je dat detaljni opis definisanja ulaznih parametara simulacije i prezentovan softver koji je korišćen za numeričku analizu.

Upporedni prikaz rezultata numeričke i eksperimentalne analize je dat u poglavlju sedam. Na kraju poglavlja je dat uporedni prikaz dijagrama granične deformabilnosti definisanog eksperimentalnom i numeričkom metodom.

U osmom poglavlju je u vidu diskusije dat osvrt na ostvarene rezultate.

U pretposlednjem poglavlju su data zaključna razmatranja.

Poslednje poglavlje predstavlja naučni doprinos i mogućnost primene rezultata u praksi.

Pregled literature se nalazi na samom kraju doktorske disertacije.

Alati korišćeni za eksperimentalna istraživanja su izrađeni u Fabrici kotrljajnih ležaja i kardana Temerin i firmi ELMetal iz Ade. Praćenje parametara procesa deformisanja je izvršeno primenom davača sile i hoda povezanih s računarom preko mernog pojačala Spider 8. Davači sile i hoda kao i merno pojačalo su proizvedeni od strane HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik, Nemačka).

Svi tekstualni i grafički prikazi kao i numeričke simulacije su realizovane primenom sledećih softverskih paketa:

- Za prikaz i obradu teksta je primenjen Microsoft Office Word 2010,
- Za merenje ostvarene lokalne deformacije primenjen je AutoCAD 2012,
- Grafici i numerički proračuni su realizovani primenom Microsoft Excel 2010 i programa Mathematica,
- Analiza primenom metode konačnih elemenata je izvršena u programskom paketu Simufact Forming 13.0 (Simufact Engineering GmbH, Hamburg, Nemačka).

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA DEFORMABILNOSTI MATERIJALA, PREDMET I CILJ ISTRAŽIVANJA

2.1 DEFORMABILNOST MATERIJALA

Primena neke od mnogobrojnih metoda obrade deformisanjem u komercijalne svrhe uslovljena je minimalnim utroškom, kako materijala i energije tako i vremena izvođenja samog procesa. Da bi se ovi uslovi ispunili, neophodna je adekvatna optimizacija tehnološkog procesa. Jedini način da se izvrši adekvatna optimizacija tehnološkog procesa je tačno definisanje mogućnosti korišćenja sposobnosti potrebnog materijala da se maksimalno deformiše.

Deformabilnost materijala predstavlja ključni faktor preko kojeg je moguće uspostaviti odnos između ponašanja materijala unutar obradnog sistema, parametara procesa i spoljašnjih uslova. U literaturi postoji niz definicija deformabilnosti materijala i ovaj pojam se često dovodio u vezu s pojmom plastičnosti materijala. Prema Kolmogorovu [33] deformabilnost materijala predstavlja mogućnost materijala da pri određenim uslovima obrade trajno promeni oblik, a da pri tome ne dođe do oštećenja obratka, lokalizacije deformacija ili bilo kakvog vida oštećenja mikrostrukture. S druge strane, plastičnost materijala takođe predstavlja sposobnost materijala da se trajno deformiše, ali u kontrolisanim, stalno istim uslovima obrade, odnosno u uslovima koji ne uzimaju u obzir specifičnosti određenog realnog procesa deformisanja. Karakteristike koje služe kao pokazatelj plastičnosti materijala su: odnos granice tečenja i čvrstoće materijala, veličina ravnomerne deformacije pri ispitivanju materijala na zatezanje (eksponent deformacionog ojačavanja), prekidna kontrakcija preseka, normalna anizotropija, itd. Za razliku od deformabilnosti materijala koja zavisi od niza faktora (o kojima će kasnije biti više reči), plastičnost zavisi samo od hemijskog sastava i mikrostrukture materijala i može poslužiti za preliminarnu procenu deformabilnosti materijala [73].

Prema Dieteru [16] deformabilnost se može definisati i kao tehnološki koncept koji omogućuje optimalno projektovanje tehnološkog procesa plastičnog deformisanja. Kao takav tehnološki koncept, deformabilnost doprinosi racionalnoj proizvodnji delova složene geometrije i dobrih mehaničkih osobina.

Deformabilnost materijala predstavlja kompleksno svojstvo materijala i zavisi od mnogobrojnih faktora. Ova osobina materijala se može funkcionalno izraziti u sledećem obliku [73]:

$$\varphi_e^s = f(M, S, T, \dot{\varphi}, T_\sigma, \dots) \quad (2.1)$$

gde je:

M – hemijski sastav materijala

S – mikrostruktura materijala

T – temperatura obrade

$\dot{\varphi}$ – brzina deformisanja

T_σ – tenzor napona.

Hemijski sastav materijala nominalno određuje vrstu materijala koja sama po sebi u velikoj meri određuje granicu obradivosti. Dosadašnja istraživanja su dala određene informacije o hemijskom sastavu čeličnih materijala koji se mogu uspešno obrađivati deformisanjem u hladnom stanju. Te informacije se najviše odnose na sadržaj ugljenika i legirajućih elemenata, mada i prateći elementi igraju bitnu ulogu kada je u pitanju mogućnost obrade hladnim zapreminskim oblikovanjem [73].

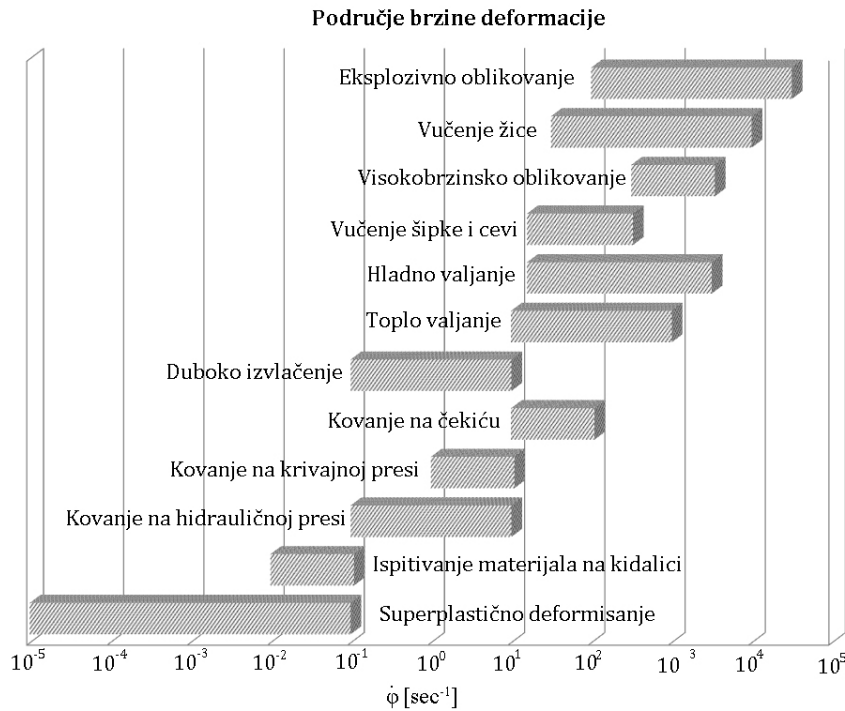
Mikrostruktura materijala takođe ima izuzetno bitan uticaj na deformabilnost materijala, a naročito u uslovima hladne obrade deformisanjem. Mikrostruktura radnog komada u trenutku obrade ne mora da bude ista kao mikrostruktura isporučenog polufabrikata. Proizvodnja polufabrikata u velikoj meri određuje strukturno stanje u pogledu hemijskog sastava i sadržaja uključaka i nečistoća u materijalu. Hemijski sastav limitira određena strukturna stanja koja se mogu dobiti primenom različitih metoda termičke obrade. Primenom termičke obrade moguće je, u određenoj meri, prilagoditi mikrostrukturu materijala u cilju dobijanja povoljnih parametara za obradu hladnim deformisanjem. Međutim, mikrostruktura se menja i u samom procesu hladnog deformisanja, što dovodi do deformacionog ojačavanja, čime se deformabilnost materijala smanjuje. Stoga je u praksi čest slučaj da se prilikom višefazne obrade deformisanjem između dve faze deformisanja radni komad podvrgne nekoj od metodologija termičke obrade kako bi se efekat deformacionog ojačanja neutralisao i kako bi se radni komad uspešno deformisao u narednoj fazi [73].

Hemijski sastav i polazna mikrostruktura materijala određuju polaznu obradivost materijala za hladno oblikovanje. Pošto u toku procesa deformacije dolazi do promene mikrostrukture, samim tim dolazi i do promene deformabilnosti. Stoga su hemijski sastav i mikrostruktura materijala parametri koje određuje sam materijal [73].

Temperatura obrade je faktor koji značajno utiče na deformabilnost materijala i predstavlja jedan od uslova obrade. U zavisnosti od temperature obrade vrši se obrada deformisanjem na toplo ili na hladno. Problemi obradivosti čeličnih materijala su znatno složeniji pri hladnoj deformaciji (od sobne temperature do 300°C) nego pri toploj [73].

Brzina deformisanja ima značajnu ulogu u procesima obrade deformisanjem jer mehanizam plastične deformacije često zavisi direktno od brzine deformisanja, što znači da ona može direktno uticati na ponašanje materijala u toku obrade. Brzine deformisanja u procesima plastičnog deformisanja kreću se u dijapazonu od 10^{-5} – 10^5 [sec⁻¹], slika 2.1. Obradivost

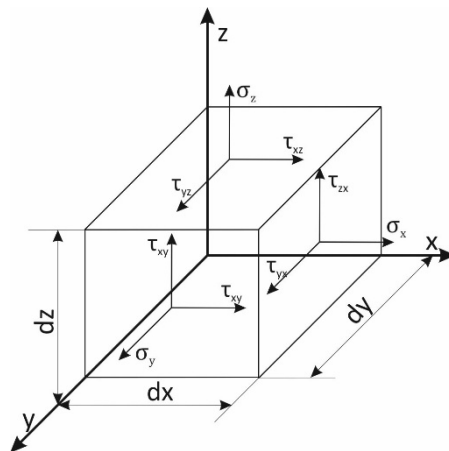
materijala može biti različita pri različitim brzinama deformisanja. Teško obradivi materijali se u pojedinim slučajevima mogu uspešno obrađivati visokobrzinskom obradom. Međutim, u okviru konvencionalnih brzina deformisanja u dijapazonu od $10^{-1} - 10^2$ [sec⁻¹], sama brzina deformisanja na obradivost materijala u hladnom stanju ne igra bitnu ulogu.



Slika 2.1 Područje brzine deformacije pri različitim načinima obrade [73]

Naponsko stanje je faktor koji najviše utiče na deformabilnost odnosno obradivost materijala u procesima zapreminskog deformisanja. Ako se analizira deformabilnost samo jednog materijala, s određenom polaznom strukturom, na konstantnoj temperaturi, s nepromenljivom brzinom deformacije, tada veličina granične deformacije zavisi isključivo od naponskog stanja definisanog tenzorom napona [73]:

$$\varphi_e^g = f(T_\sigma) \tag{2.2}$$



Slika 2.2 Naponi na površinama elementarnog paralelopeda [15]

Naponsko stanje posmatrane tačke obratka je jednoznačno određeno i definisano tenzorom napona. Ukoliko se želi opisati naponsko stanje u nekoj određenoj tački, pogodno je zamisliti da kroz tu tačku prolaze tri međusobno upravne ravni, pri čemu na svaku ravan deluju po jedan normalni i dva tangencijalna napona. Kako bi to bilo jasnije, potrebno je zamisliti elementarni paralelopiped koji se nalazi oko posmatrane tačke, a stranice tog paralelopipeda su upravne na ose usvojenog koordinatnog sistema, slika 2.2.

Posmatrajući sliku 2.2 moguće je zapisati i izraz za tenzor napona u obliku [15]:

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Ma koji tenzor napona se može predstaviti kao zbir sfernog tenzora i devijatora tenzora napona [15]:

$$T_{\sigma} = T_{S(\sigma)} + T_D^{\sigma} \quad (2.4)$$

Sferni tenzor napona predstavlja komponentu hidrostatičkog napona koja u području elastičnih deformacija teži da promeni zapreminu. Iako je poznato da se fenomen stišljivosti materijala u procesima deformisanja zanemaruje, komponente sfernog tenzora napona (pritisak ili zatezanje) značajno utiču na vrednost granične deformacije određujući trenutak nastanka pukotine u materijalu.

Devijator tenzora napona treba shvatiti kao meru odstupanja postojećeg naponskog stanja od stanja svestranog istovrsnog naprezanja pri kom ne bi došlo do plastične deformacije. Pri tome, devijator tenzora napona ima sledeći oblik [15]:

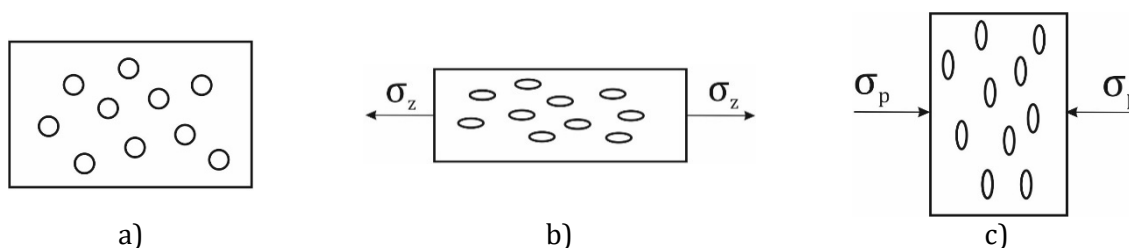
$$T_D^{\sigma} = T_{\sigma} - T_{S(\sigma)} \quad (2.5)$$

$$T_D^{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sigma_m & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_m & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_m \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$T_D^{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & d_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & d_z \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Uticao naponskog stanja na veličinu deformacije pre razaranja se najbolje opisuje uticajem naponskog stanja na mikrošupljine koje postoje u materijalu [50], slika 2.3a. Naime, pozitivne komponente napona (zatezanje) negativno utiču na deformabilnost materijala jer stimulišu nukleaciju mikrošupljina, što dovodi do razaranja materijala, slika 2.3b. S druge strane, uticaj pritisnih komponenti napona se može okarakterisati kao pozitivan, jer svojim dejstvom omogućuje eliminaciju već postojećih mikrošupljina i sličnih oštećenja mikrostrukture, ali i sprečavaju nastanak novih. U procesima obrade deformisanjem usled dejstva pritisnih napona mikrošupljine se mogu potpuno zatvoriti i nestati. Ovaj pozitivan uticaj pritisnih komponenti

napona doprinosi sporijem dostizanju kritičnog nivoa oštećenja mikrostrukture što predstavlja direktan uslov za dostizanje većih vrednosti granične deformacije.



Slika 2.3 Uticaj naponskog stanja na mikrošupljine u materijalu [50]

Vujović je sa saradnicima u radu [60] pokazao da je granična deformacija u slučaju pritisknih napona osam puta veća nego u slučaju zateznih napona. Ispitivanja su vršena na niskougleničnom čeliku.

Hidrostatička obrada omogućuje deformaciju i teško deformabilnih materijala. Zahvaljujući povećanju hidrostatičkog pritiska u zoni deformisanja dolazi do povećanja deformabilnosti. Samim tim, adekvatnim dizajniranjem tehnološkog procesa moguće je kontrolisati naponsko stanje u zoni deformisanja, što u pojedinim slučajevima značajno povećava granične mogućnosti deformisanja [15].

Istraživanja deformabilnosti materijala kod zapreminskog deformisanja, kako u hladnom, tako i u toplom stanju, imaju za cilj širenje primene ove obrade na složene oblike obradaka, koji se izrađuju od teškodeformabilnih materijala, tj. od materijala koji imaju niska polazna plastična svojstva. Poznavanje granične deformabilnosti materijala omogućuje projektovanje tehnološkog procesa obrade s minimalnim brojem faza ili operacija obrade, što omogućuje smanjenje ukupnih troškova proizvodnje [60].

U monografiji [73] Vujović je naglasio da ne postoji univerzalan test pomoću kog se može odrediti deformabilnost materijala. To je pojam koji je moguće potpunije definisati pomoću niza naučnih informacija. Važno je naglasiti da su u pitanju naučne informacije o stanju procesa deformisanja u trenutku koji predstavlja granicu deformisanja pred nastajanje pukotine, odnosno razaranja materijala.

Deformabilnost materijala, odnosno ponašanje materijala u različitim uslovima hladnog zapreminskog deformisanja, ispitali su mnogi autori. U tu svrhu, autori su koristili različite modele deformisanja. Ispitivanja su vršena na raznim metalnim materijalima.

Gusel i saradnici su u radu [22] vršili ispitivanje deformabilnosti bakarnih legura pri hladnom istosmernom istiskivanju. Lin je vršio ispitivanje deformabilnosti materijala sabijanjem konkavno sfernim alatima [39]. Studiju o deformabilnosti legure aluminijuma pri hladnom sabijanju su sprovedeli Narayanasamy i saradnici [47]. Vilotić i dr. su u radu [64] istraživali deformabilnost čelika C45E (Č1531) pri sabijanju alatima V oblika. Deformabilnost čelika C45E u slučaju sabijanja cilindričnim i ravnim alatima ispitali su Vilotić i saradnici [59]. Test sabijanja pravougaonih uzoraka cilindričnim alatima su prikazali Alexandrov i dr. [3]. Klocke i Brauer [32] su ispitali uticaj oblika uzorka, kvaliteta spoljne površine kao i mikrostrukture na pojavu oštećenja strukture pri hladnom sabijanju ravnim alatima. U radu [49] autori su ispitali uticaj polaznih dimenzija i triboloških uslova na deformabilnost materijala. Deformabilnost materijala usled zatezanja aluminijumskih epruveta je prikazana u radu [13]. Özgür [36] je

istraživao deformabilnost čelika 100Cr6, čelika X5CrNiMo1810 i mesinga CuZn39. Za svoja istraživanja primenio je razne vrste uzoraka.

Sabijanje cilindra sačinjenog iz više slojeva je prikazano u radovima [12, 54, 43]. Valjci istih prečnika, a malih visina su naslagani jedan na drugi i vršeno je sabijanje ravnim alatima. Na ovaj način dolazi do pojave dvoosnog zateznog naponskog stanja u slojevima uzoraka koji čine jednu celinu, što još jednom potvrđuje činjenicu da geometrija uzoraka značajno utiče na pojavu naponskog stanja u toku procesa. Autori su u ovim radovima zaključili da je test sabijanja valjka sačinjenog iz više slojeva pogodan za određivanje krive tečenja, ali samo do vrednosti granične deformacije do 0,7.

Ispitivanje uticaja hidrostatičkog pritiska na deformabilnost materijala pri sabijanju i zatezanju je prikazano u radu [10]. Deformabilnost mesinganih uzoraka je prikazana u radovima [56, 26]. U radu [48] Narayanasany je sa saradnicima vršio ispitivanje deformabilnosti uzoraka dobijenih sinterovanjem nikel-hrom-molibdenom legiranog čeličnog praha. Cilj eksperimenta je bio da se ostvari homogena deformacija u toku procesa. Autori su za ispitivanje koristili cilindrične uzorke, a podmazivanje je vršeno mazivom na bazi grafita, čime je homogenost deformisanja i omogućena. Ispitivanje deformabilnosti raznih modela deformisanja je prikazano u [11]. Autor je kao cilj svojih istraživanja imao pronalaženje novih kriterijuma loma. Kalibraciju i evaluaciju sedam različitih kriterijuma loma izvršio je Wierzbicki sa saradnicima u radu [10]. Problematikom kriterijuma loma u oblasti deformabilnosti materijala su se bavili razni autori, a neka od dostignuća u toj oblasti su prikazani u [23, 49].

2.2 METODOLOGIJA ODREĐIVANJA DGD-A

Obimna istraživanja koja su sprovedena, kako u oblasti obrade metala deformisanjem tako i u oblasti deformabilnosti materijala, ukazuju na činjenicu da na ponašanje materijala u obradnom sistemu utiče veliki broj faktora. Svi ti faktori mogu se svrstati u dve grupe i to faktore uslovljene materijalom i faktore uslovljene obradnim sistemom [60, 73].

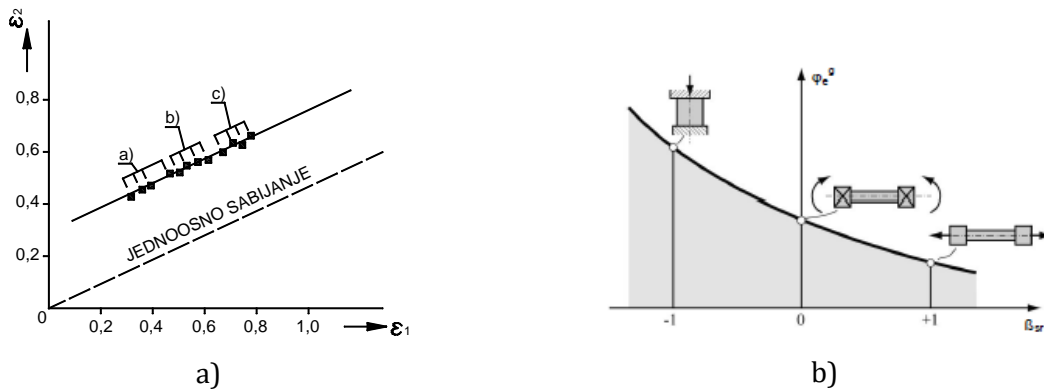
Faktori uslovljeni obradnim sistemom nastaju kao posledica određenih uslova obrade. Za slučaj ispitivanja samo jednog materijala, određenog hemijskog sastava i mikrostrukture, uslovi obradnog sistema predstavljaju ključni i presudni faktor na mogućnosti deformisanja materijala, odnosno postizanja granične deformacije. Od svih faktora uslova obrade, naponsko stanje generisano u zoni deformisanja ima dominantan uticaj na vrednost granične deformacije. S obzirom na to da se kombinacijom raznih uslova obrade (promenom uslova trenja, promenom oblika alata ili priprema...) mogu stvoriti vrlo različite mehaničke šeme naponskih komponenti, od vitalnog je značaja za definisanje dijagrama granične deformabilnosti izučavanje deformabilnosti materijala s mehaničkog aspekta [60].

Drugu grupu uticajnih faktora čine faktori uslovljeni izabranim materijalom. U ovu grupu spadaju hemijski sastav materijala i mikrostruktura. Na hemijski sastav i mikrostrukturu se može uticati odgovarajućim metalurškim postupcima u toku same proizvodnje materijala kao i određenim termičkim tretmanima polufabrikata. Neretko se dešava da se mikrostruktura polufabrikata razlikuje po zapremini, što može znatno uticati na vrednosti graničnih deformacija za uzorke izrađene od istog polaznog materijala [60].

Grafičku interpretaciju deformabilnosti materijala predstavlja dijagram granične deformabilnosti (DGD). U tehnologiji plastičnog deformisanja postoje dve metodologije koje se

koriste za definisanje dijagrama granične deformabilnosti u oblasti zapreminskog deformisanja [60, 73].

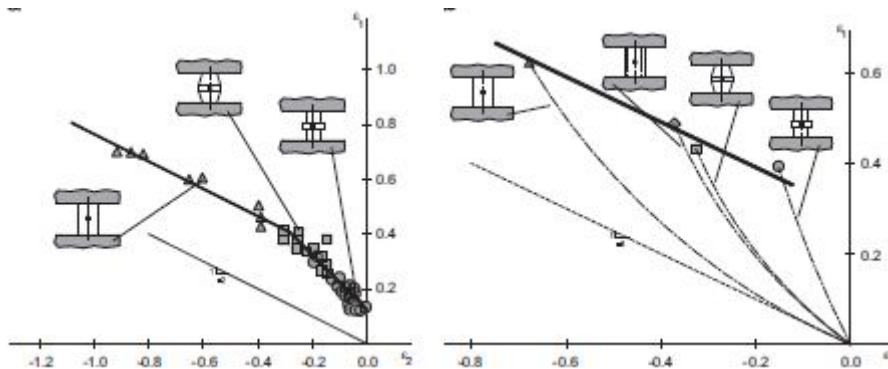
Prva metodologija se zasniva na deformacionom kriterijumu prema kojem do razaranja dolazi kada glavne deformacije (φ_1 i φ_2) dostignu kritičnu vrednost (slika 2.4a). Druga metodologija je bazirana na naponskom kriterijumu prema kojem do razaranja dolazi kada efektivna deformacija (φ_{eg}) dostigne kritičnu vrednost u određenim naponskim uslovima (slika 2.4b) [50].



a) b)
Slika 2.4 Dijagram granične deformabilnosti [50]
 a) hrapav alat, b) poliran alat, c) podmazan alat

Analiziranjem vrednosti glavnih deformacija u trenutku nastanka pukotine, prema slici 2.4, uočava se da između glavnih deformacija postoji linearna zavisnost.

Martins je sa svojim saradnicima prikupio određene podatke u vezi s definisanjem dijagrama granične deformabilnosti primenom ove metode i u radu [40] prikazao dijagrame granične deformabilnosti za čelik AISI 1045 i leguru olova L52905, slika 2.5. Na slici se takođe mogu videti modeli deformisanja korišćeni za definisanje dijagrama.



Slika 2.5 Dijagram granične deformabilnosti za čelik AISI 1045 i leguru olova L52905 [40]

Ovakav pristup određivanja granične deformabilnosti je prisutan i u radovima [18, 51, 47, 17, 1, 23, 19, 20, 38, 7, 27].

Drugi pristup u istraživanju deformabilnosti materijala plastičnim deformisanjem odnosi se na istraživanje zavisnosti graničnih deformacija i naponskog stanja. U ovom slučaju uticaj naponskog stanja se uzima u obzir preko pokazatelja naponskog stanja β . Dijagram granične deformabilnosti dobijen na ovaj način predstavlja grafičku interpretaciju funkcionalne zavisnosti granične efektivne deformacije od pokazatelja naponskog stanja. Ova zavisnost se

može predstaviti i u obliku jednačine 2.8. Bitno je napomenuti da je ovo opšti pristup koji se pretežno primenjuje u području zapreminskog deformisanja [73].

$$\varphi_e^g = f(\beta) \quad (2.8)$$

Osnove ovakvog načina definisanja dijagrama granične deformabilnosti su postavili ruski naučnici Kolmogorov, Gupkin [33]. Na ovaj način, konstruisan je dijagram granične deformabilnosti u funkciji naponskog stanja na kraju procesa deformisanja, dok se promena naponskog stanja u toku samog procesa nije uzimala u obzir. Samim tim, ova metodologija je bila pogodna za definisanje granične deformacije u slučaju primene modela deformisanja kod kojih je ispunjen uslov nepromenljivosti pokazatelja naponskog stanja, odnosno za slučaj monotonih procesa deformisanja. U ovom slučaju se za proračun pokazatelja naponskog stanja uzimaju samo maksimalni i minimalni napon ostvaren u toku procesa. Na taj način ne dobija se adekvatna slika o naponskom stanju unutar materijala tokom procesa obrade. U ovoj disertaciji je dat prikaz istorije pokazatelja naponskog stanja u cilju dokazivanja monotonosti ispitivanih modela.

Uzimajući u obzir pomenute dve grupe faktora koje direktno utiču na ponašanje materijala u toku obrade deformisanjem dolazi se do zaključka da je izuzetno teško ostvariti monoton proces deformisanja. Stoga je Kolmogorov dopunio ovakav postupak određivanja dijagrama granične deformacije time što je uveo mogućnost primene i nemonotonih procesa deformisanja za određivanje granične deformacije [33]. Prema hipotezi plastičnog loma koju je uveo Kolmogorov, oštećenje mikrostrukture tokom deformisanja materijala direktno zavisi od pokazatelja naponskog stanja. S obzirom na to da se pokazatelj naponskog stanja menja u toku vremena sledi da njegova vrednost na kraju procesa ne može biti merodavna za definisanje granične deformabilnosti, već se mora u obzir uzeti i ta promena. Iz tog razloga, uvodi se pojam srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja na kritičnom mestu obratka i definiše se na sledeći način [71]:

$$\beta_{sr} = \frac{1}{\varphi_e^g} \int_0^{\varphi_e^g} \beta(\varphi_e) d\varphi_e \quad (2.9)$$

Ovako definisan pokazatelj naponskog stanja uzima u obzir takozvanu istoriju procesa deformisanja, a ne samo stanje na kraju procesa kada dolazi do razaranja materijala. U slučaju monotonih procesa deformisanja pokazatelj naponskog stanja ima konstantnu vrednost pa je određivanje položaja modela na dijagramu granične deformabilnosti olakšano. Međutim, veoma je mali broj procesa obrade metala deformisanjem kod kojih je ispunjen uslov monotonosti. Pronalaženje modela koji će obezbediti ispunjavanje uslova monotonosti predstavlja i cilj ove disertacije.

Slična metodologija definisanja dijagrama granične deformabilnosti primenjena je i u disertaciji. Prema [68, 71, 31] za definisanje osnovnog oblika krive granične deformabilnosti koriste se tri osnovna modela deformisanja, i to: jednoosno zatezanje, čisto uvijanje i jednoosno sabijanje, slika 2.4b. Primena ovih modela omogućila je pouzdano utvrđivanje vrednosti granične deformacije φ_e^g i pokazatelja naponskog stanja β , koji je u ovom slučaju definisan preko sledećeg izraza:

$$\beta = \frac{I_1}{\sqrt{3 \cdot |J_2|}} = \frac{3\sigma_m}{\sigma_e} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}} \quad (2.10)$$

Dijagram granične deformabilnosti pokazuje da nižim vrednostima pokazatelja naponskog stanja odgovaraju znatno više vrednosti granične deformacije. Takođe, dijagram pokazuje da negativnim vrednostima β faktora odgovaraju šeme napona s pritisnim komponentama, dok pozitivnim vrednostima odgovaraju šeme napona sa zateznim komponentama. S praktičnog stanovišta to znači da je u obradnim sistemima u kojima se promena oblika izvodi pritisnim naponima moguće ostvariti znatno više vrednosti granične deformacije u odnosu na obradne sisteme u kojima se deformisanje izvodi zatezanjem [60].

Ispoljavanje potencijala deformabilnosti zavisi od naponskog stanja, što dalje znači da se promenom naponskog stanja menja mogućnost materijala da ispoljava deformabilnost. Zbog toga, kriterijum za ispoljavanje potencijala deformabilnosti treba da bude izražen preko veze granične efektivne deformacije φ_{eg} i naponskog stanja koje vlada u materijalu i koje se može predstaviti preko pokazatelja naponskog stanja ili naponskog indeksa deformabilnosti β [68, 71].

Uspostavljanjem veze između granične deformacije i pokazatelja naponskog stanja dobija se implicitni oblik tražene funkcionalne zavisnosti:

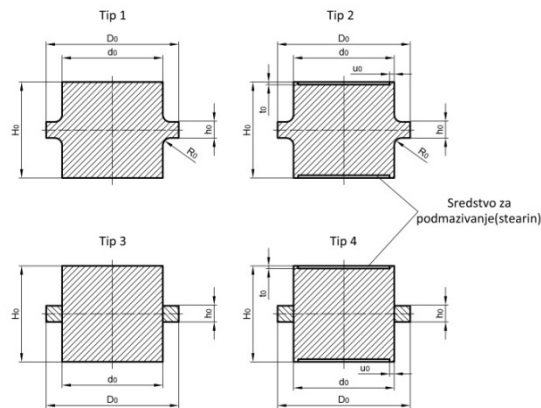
$$\varphi_{eg} = f(\beta) = f\left[\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e}\right] \quad (2.11)$$

Teorijsko rešenje ove zavisnosti nije moguće odrediti, što znači da je određivanje funkcije $f(\beta)$ moguće izvesti samo eksperimentalno. Početak eksperimentalnih istraživanja predstavlja pronalaženje takvih modela deformisanja za koje je moguće definisati naponsko stanje.

Određivanje krive granične deformabilnosti je veoma složeno. Deformisanjem uzorka do pojave oštećenja (pukotine) pri određenim uslovima obrade dobija se samo jedna vrednost pokazatelja naponskog stanja β , odnosno jedna tačka na dijagramu granične deformabilnosti. Da bi se dobila kompletna kriva granične deformabilnosti mora se izvršiti niz eksperimenata s različitim modelima deformisanja za koje su poznate vrednosti pokazatelja naponskog stanja. Potrebno je naglasiti da se granična deformacija i pokazatelj naponskog stanja utvrđuje lokalno, na mestu nastajanja oštećenja materijala. U cilju definisanja krive granične deformabilnosti uglavnom se primenjuju jednostavni modeli deformisanja kod kojih je relativno lako utvrditi naponsko-deformaciono stanje.

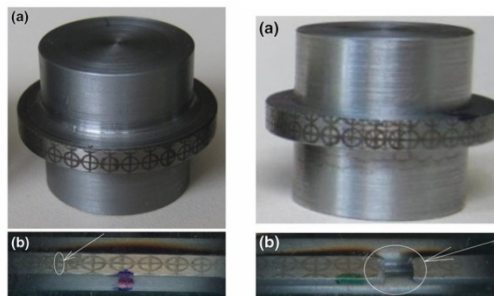
Iako je test jednoosnog zatezanja dugo važio za jedan od tri osnovna testa za određivanje dijagrama granične deformabilnosti, novija istraživanja su pokazala da on nije u potpunosti adekvatan za tu svrhu. Kod jednoosnog zatezanja pojavljuje se lokalizacija deformacija, što dovodi do promene naponskog stanja, a samim tim i do promene vrednosti pokazatelja naponskog stanja u toku procesa, što značajno utiče na pojavu oštećenja strukture [44]. U radu [5] je dat predlog da se test jednoosnog zatezanja zameni testom sabijanja cilindra s prstenom. Za određivanje granične deformacije u autori su varirali dimenzije i oblik uzoraka kao i parametre trenja. Izrađeni su uzorci s prstenom koji je izrađen zajedno s cilindrom (tip 1 i 2) i prstenom koji se izrađuje posebno i naknadno postavlja na cilindar (tip 3 i 4), a prikazani su na slici 2.6. Korišćene su dve početne visine prstenova, od 4 mm i 8 mm. Takođe, cilindrični deo je u

slučaju uzoraka tipa 2 i 4 izrađen s posebnim žljebovima kako bi se kao sredstvo za podmazivanje mogao koristiti stearin i time maksimalno umanjio uticaj trenja na proces deformisanja.

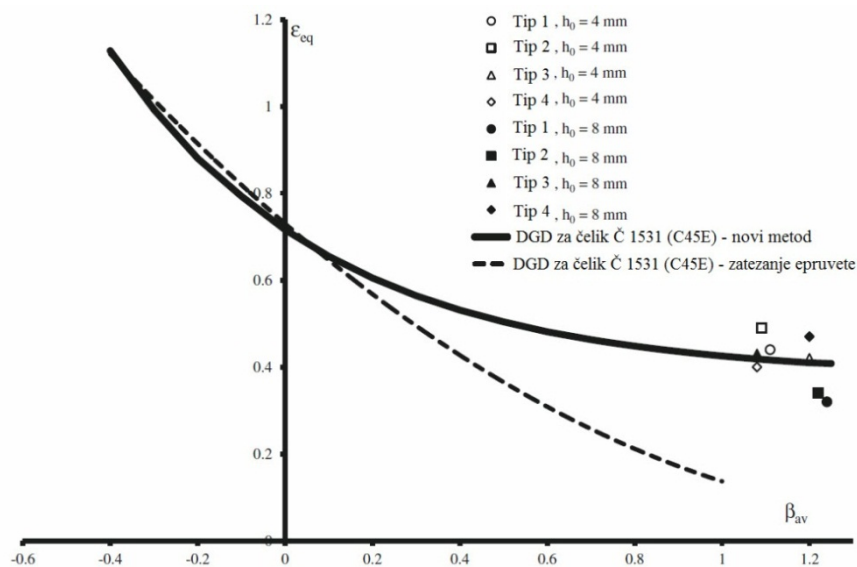


Slika 2.6 Geometrija četiri tipa uzoraka [5]

Svi uzorci su na prstenu imali nanесenu mrežu koja je korišćena za praćenje promene deformacija u toku procesa. Kao što je i očekivano, pukotina se pojavila na spoljašnjoj površini prstena. Na slici 2.7 je dat izgled uzorka pre i posle sabijanja.



Slika 2.7 Cilindar s prstenom a) pre sabijanja b) i nakon procesa sabijanja s vidljivom pukotinom (tip 1 i 3) [5]



Slika 2.8 Dijagram granične deformabilnosti za čelik Č 1531 [5]

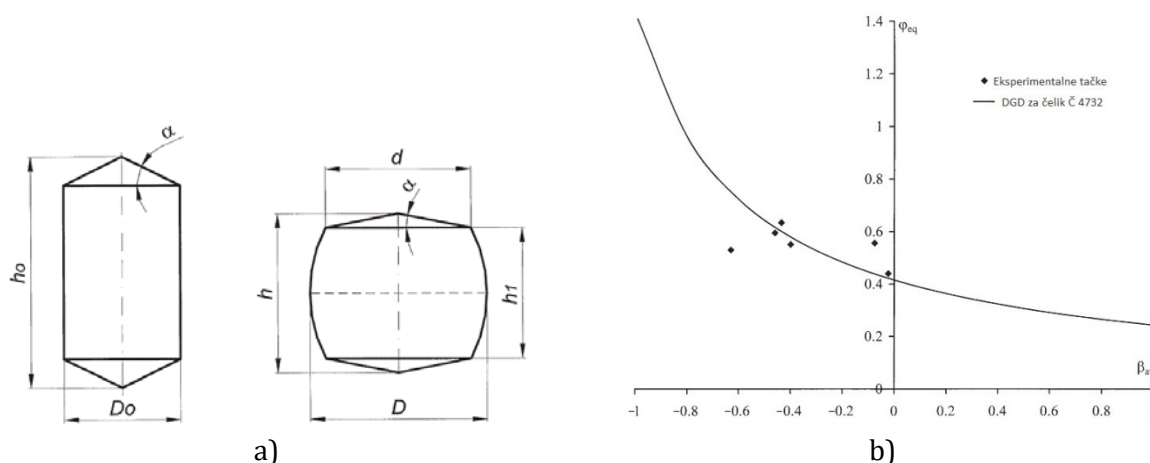
Merenjem geometrije merne mreže određene su komponente deformacije ε_θ i ε_z i na osnovu njih je određeno naponsko stanje na mestu pojave pukotine kao i srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja β_{av} i granične deformacije ε_{eq} . Vrednosti su unete u DGD prikazan na slici 2.8. Isprekidana linija predstavlja DGD određen na osnovu tri osnovna modela deformisanja, slobodnog sabijanja valjka, torzije i aksijalnog zatezanja, dok je punom linijom prikazana kriva određena primenom slobodnog sabijanja valjka, torzije i sabijanja cilindra s prstenom. Uočava se da su vrednosti granične deformacije u slučaju sabijanja valjka s prstenom znatno više u odnosu na klasičan test aksijalnog zatezanja.

Prema autorima, test sabijanja cilindra s prstenom trebalo bi da obezbedi tačnije rezultate nego test aksijalnog zatezanja [5]. Problematika konstruisanja dijagrama granične deformabilnosti na ovaj način zapravo predstavlja problematiku određivanja geometrije i dimenzija uzorka koji bi se koristili u testu, dok kod aksijalnog zatezanja takav problem ne postoji.

2.3 PRIMENA RAZLIČITIH MODELA DEFORMISANJA ZA ODREĐIVANJE DGD-a

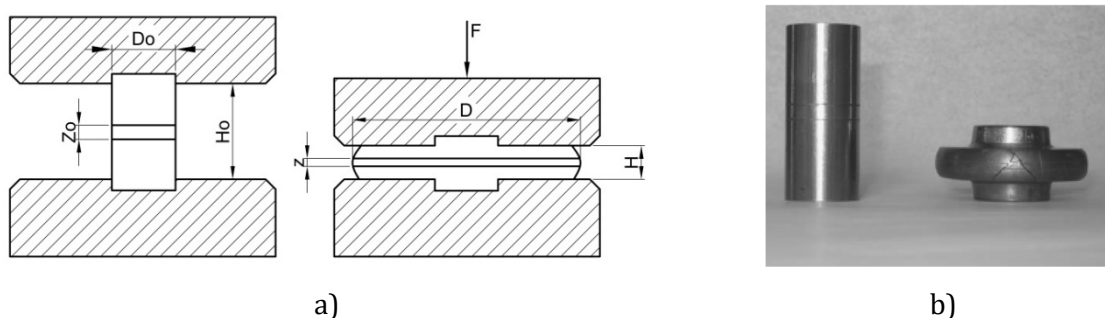
Za definisanje dijagrama granične deformabilnosti, u osnovi se koriste jednostavni modeli deformisanja kod kojih je lako utvrditi naponsko stanje. Pri tome je neophodno da se proces deformisanja odvija pri konstantnim vrednostima pokazatelja naponskog stanja (monotoni uslovi deformisanja). Kolmogorov je svojom teorijom plastičnog loma omogućio primenu nemonotonih modela deformisanja za određivanje dijagrama granične deformacije. Vođeni tom teorijom istraživači su koristili, a i dalje koriste, razne modele deformisanja kako bi dopunili i poboljšali već postojeći dijagram granične deformabilnosti.

U radu [67] je za određivanje dijagrama granične deformabilnosti korišćen model sabijanja cilindra konusno-konkavnim alatima. Autori su ispitivanja vršili na čeliku Č4732. Položaj primenjenih modela deformisanja na dijagramu granične deformabilnosti kao i izgled uzoraka pre i posle sabijanja je prikazan na slici 2.9. Za potrebe istraživanja autori su varirali ugao alata α .

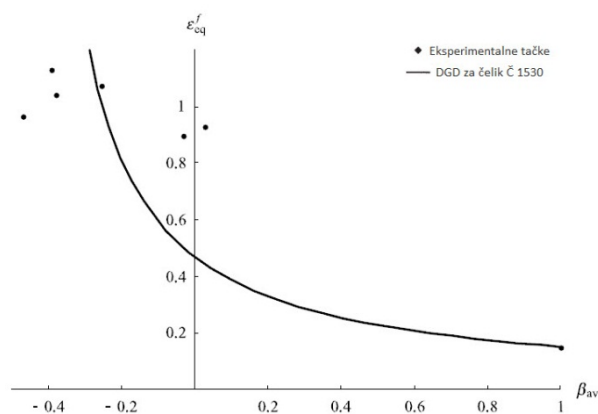


Slika 2.9 Sabijanje valjka konusno-konkavnim alatima a) šematski prikaz uzoraka pre i posle deformisanja, b) položaj modela na dijagramu granične deformabilnosti [67]

Sabijanje cilindra alatima s izdubljenim pločama je prikazano u radu [61], slika 2.10. Položaj ovih modela deformisanja na dijagramu granične deformabilnosti, za materijal Č1530 je prikazan na slici 2.11.







Slika 2.10 Sabijanje valjka izdubljenim pločama a) šematski prikaz procesa, b) uzorak pre i nakon procesa sabijanja [67]



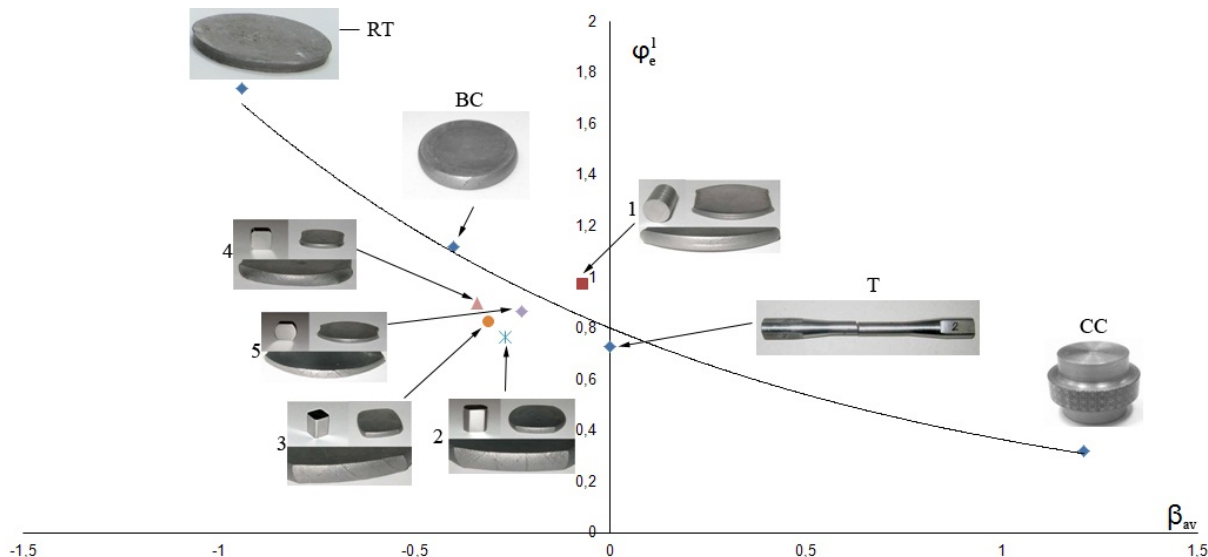
Slika 2.11 Položaj modela na dijagramu granične deformabilnosti za čelik Č1530 [67]

Tabela 2.1 Korišćeni modeli [66]

Test	Izgled uzoraka nakon deformisanja	β_{av}	φ_{e^g}
Sabijanje cilindra s prstenom (CC)		+1.21	0.32
Čisto uvijanje (T)		0.00	0.73
Sabijanje cilindra (BC)		-0.40	1.12
Rastegaev test (RT)		-0.94	1.74

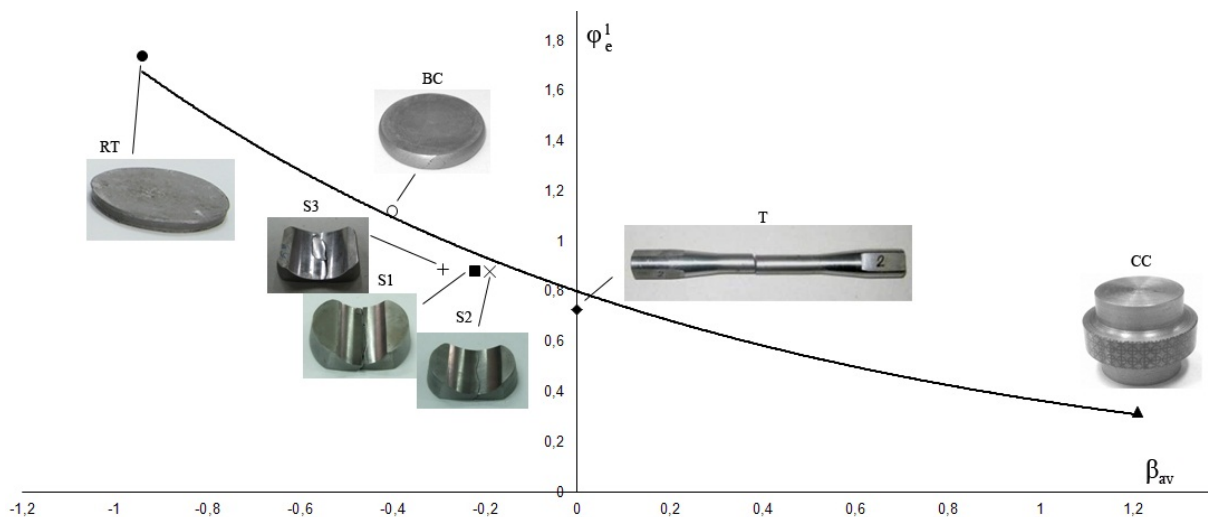
U radu [66] je prikazana primena osno nesimetričnih uzoraka za dopunu dijagrama granične deformabilnosti. Osnovna kriva granične deformacije je određena primenom testova prikazanih u tabeli 2.1.

Kriva granične deformabilnosti konstruisana primenom ovih testova i dopunjena testovima sabijanja aksijalno nesimetričnih uzoraka je prikazana na slici 2.12.



Slika 2.12 Dijagram granične deformabilnosti za čelik C45E [66]

Isti osnovni dijagram dopunjen modelima sabijanja uzoraka ravnim i cilindričnim alatima je prikazan u radu [59]. Na slici 2.13 je prikazan dijagram granične deformabilnosti kao i položaj primenjenih modela deformisanja na dijagramu. Ispitivanja su se vršila na materijalu C45E.

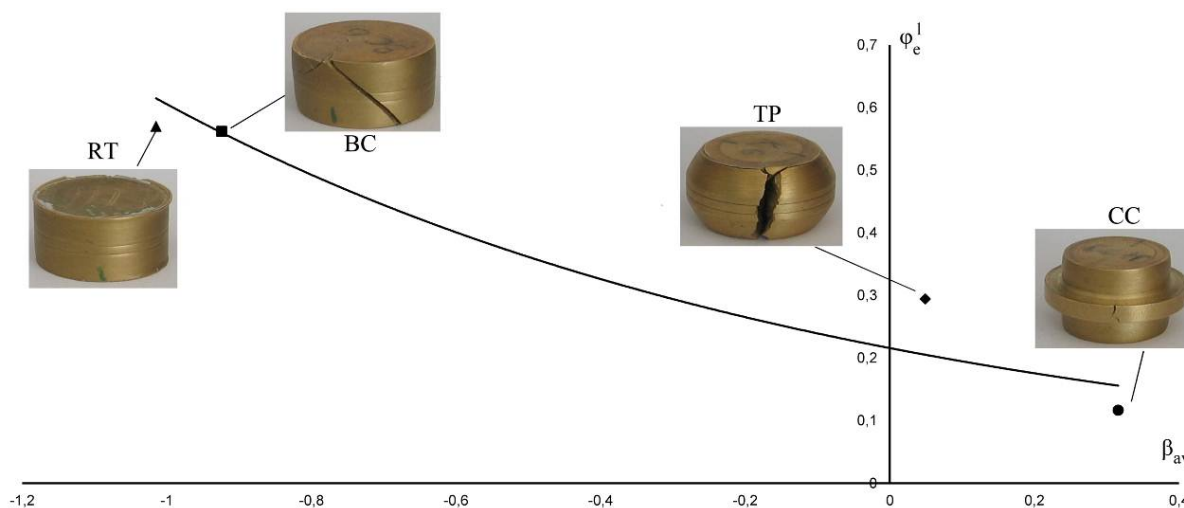


Slika 2.13 Dijagram granične deformabilnosti za Č1531[59]

U radu [25] autori su vršili ispitivanje deformabilnosti mesinga. Cilj rada je bio definisanje dijagrama granične deformabilnosti za taj materijal, a u tu svrhu su korišćena 4 modela deformisanja: sabijanje cilindra (BC), sabijanje cilindra sa žljebom (RT), sabijanje cilindra s prstenom (CC) i sabijanje cilindra s konusom (TP), slika 2.14.



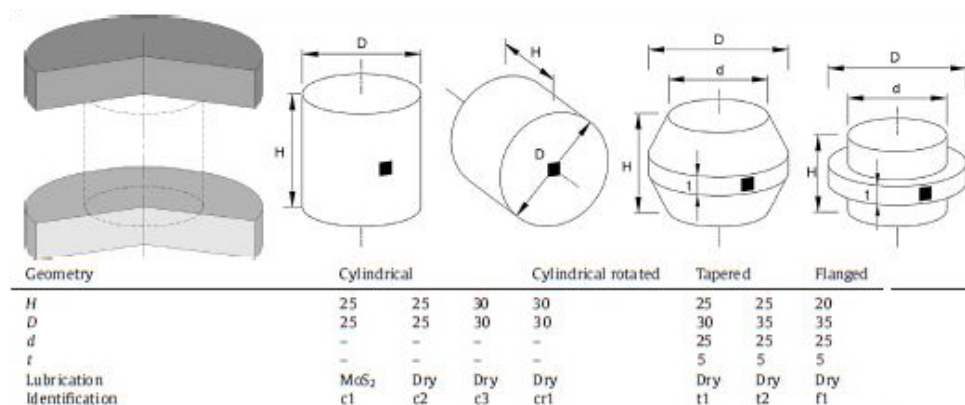
Slika 2.14 Modeli deformisanja primenjeni za određivanje DGD-a [25]



Slika 2.15 Dijagram granične deformabilnosti za mesing [25]

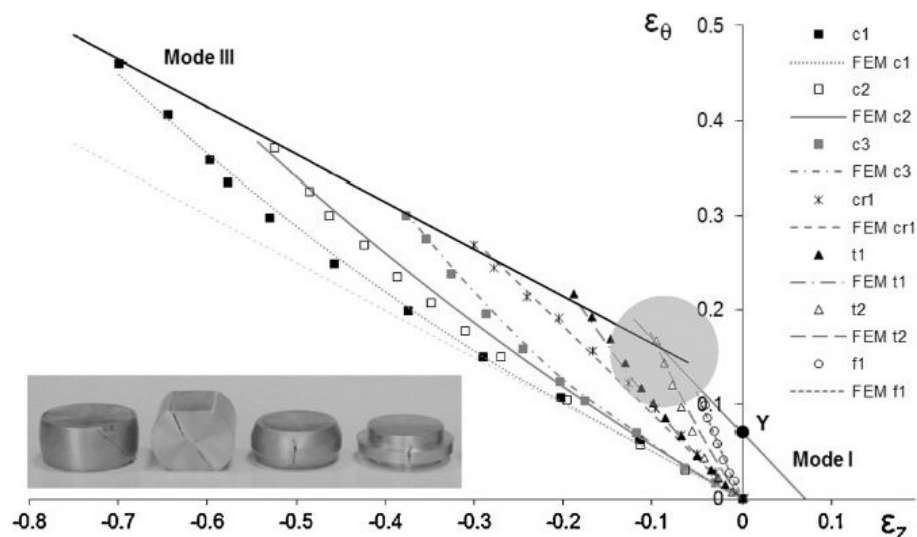
Primenom ovih modela deformisanja definisan je dijagram granične deformabilnosti u granicama $-1 \leq \beta \leq 0,4$. Izgled dijagrama kao i položaj primenjenih modela na dijagramu je prikazan na slici 2.15. U poređenju s čelikom granična deformacija je u proseku 4 puta manja.

U radu [54] izvršena su eksperimentalna i numerička ispitivanja deformabilnosti aluminijuma AA2030 - T4 pri sabijanju ravnim alatima. Za tu svrhu autori su koristili četiri grupe uzoraka, slika 2.16.



Slika 2.16 Uzorci primenjeni za ispitivanje deformabilnosti aluminijuma AA2030 - T4 [54]

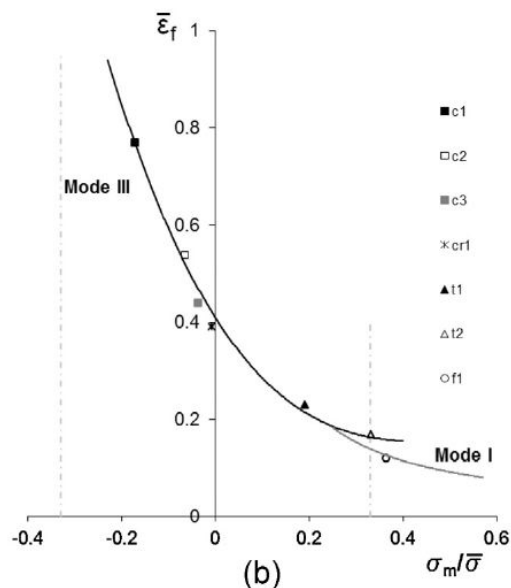
Na slici 2.17 je dat prikaz puta deformacije za ove četiri grupe uzoraka. Slika pokazuje put deformacije do pojave pukotine na svakom uzorku. U dijagram su uneti parovi tačaka dveju deformacija ϵ_z i ϵ_θ u slučaju eksperimentalnih i numeričkih istraživanja.



Slika 2.17 Put deformacije za četiri grupe uzoraka [54]

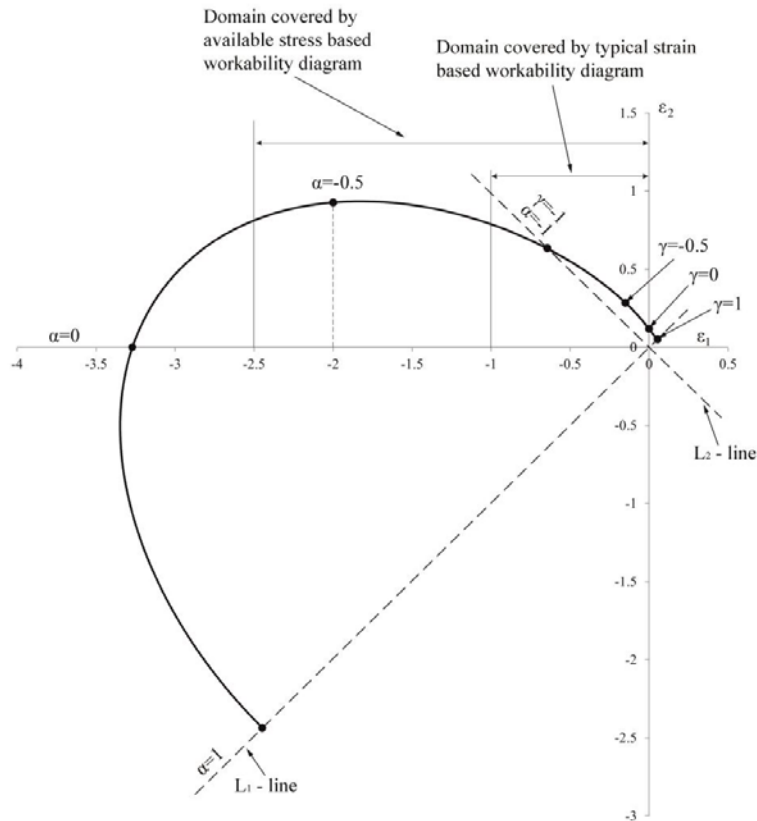
Poznavanjem vrednosti parova deformacija do pojave loma uzoraka moguće je primenom odgovarajućih jednačina, predstavljenih u radu [54], odrediti parove granične deformacije i pokazatelja naponskog stanja. Na taj način određen je dijagram granične deformabilnosti prikazan na slici 2.17.

Na slici 2.18 crnom linijom je predstavljena kriva granične deformacije dobijena na osnovu eksperimentalnih istraživanja pomenutih grupa uzoraka dok je punom sivom linijom predstavljena kriva dobijena na osnovu analitičkog proračuna odnosa priraštaja deformacija na mestima pojave pukotina za uzorke grupe t2 i f1. Razlog tome je činjenica da se kod ove dve grupe uzoraka javlja promena naponskog stanja u toku procesa, odnosno, dolazi do prelaska iz pritisknog u zatezno naponsko stanje.



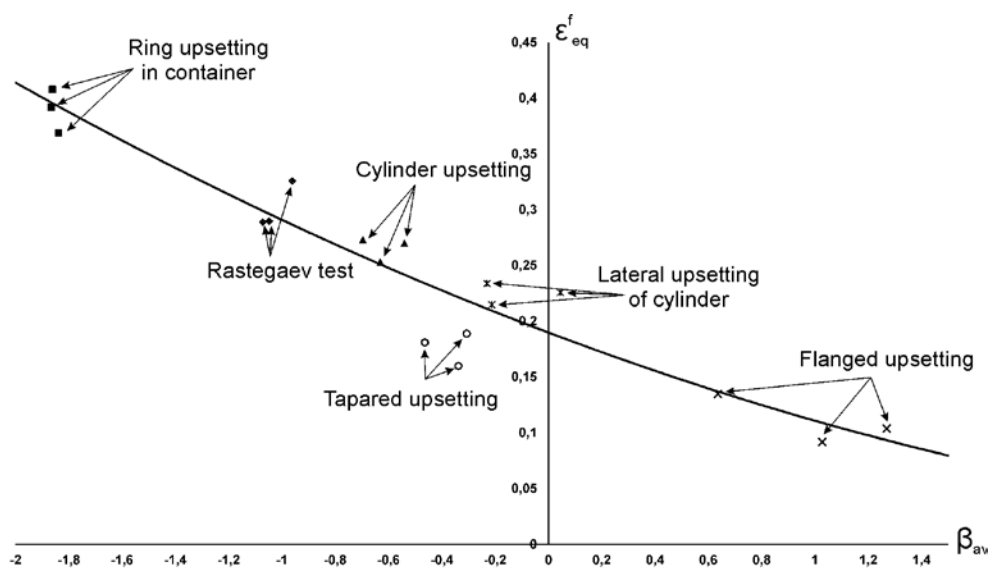
Slika 2.18 Dijagram granične deformabilnosti za aluminijum AA2030-T4 [54]

Veza između dijagrama granične deformabilnosti određenog na osnovu naponskog i deformacionog stanja je prikazana u [68].



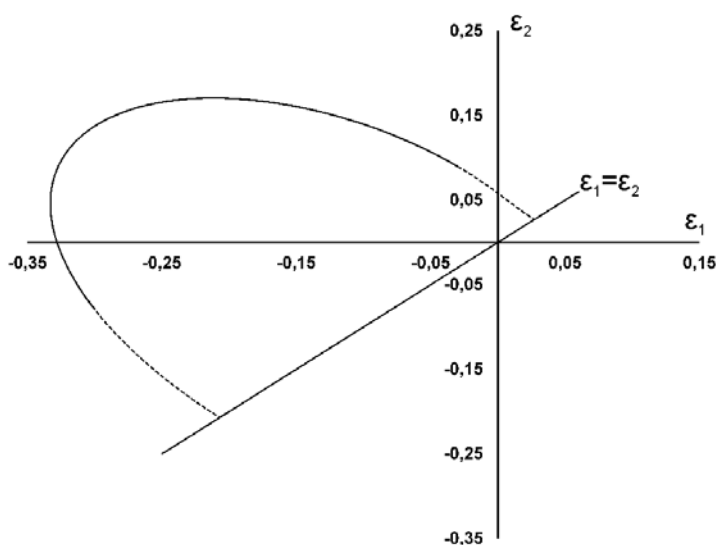
Slika 2.19 Dijagram granične deformabilnosti za čelik C45E određen na osnovu deformacionog stanja [68]

Na osnovu slike 2.19 moguće je zaključiti da je oblast definisanosti dijagrama granične deformabilnosti na ovaj način znatno veća nego u slučaju primene standardnih testova definisanja dijagrama granične deformabilnosti na osnovu pokazatelja naponskog stanja. Ovaj princip je prikazan i u radu [69] kada je definisan dijagram granične deformabilnosti za materijal Ti-6Al-4V. Prvenstveno je definisan dijagram granične deformabilnosti na osnovu naponskog stanja primenom različitih modela deformisanja, slika 2.20.



Slika 2.20 Dijagram granične deformabilnosti za Ti-6Al-4V [69]

Na slici 2.20 je moguće videti da je oblast definisanosti dijagrama granične deformabilnosti za ovaj materijal proširena u oblasti negativnih vrednosti pokazatelja naponskog stanja primenom testa sabijanja prstena u kalupu. Dijagram granične deformabilnosti za Ti-Al6-V4 baziran na deformacionom stanju je prikazan na slici 2.21.



Slika 2.21 Dijagram granične deformabilnosti za Ti-Al6-V4 određen na osnovu deformacionog stanja [69]

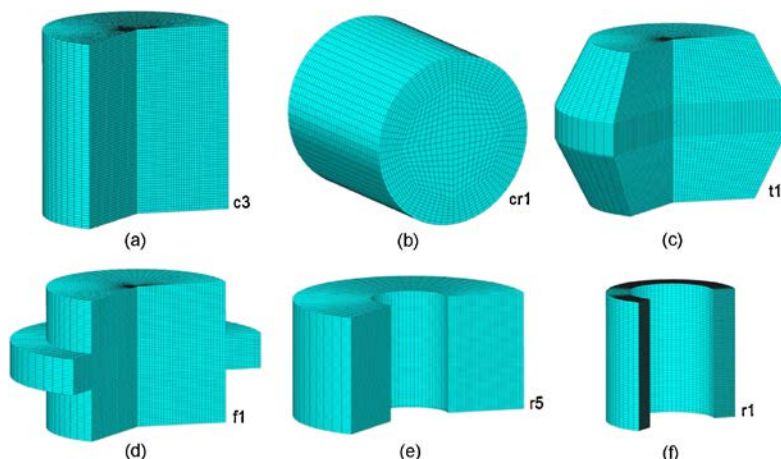
U ovom poglavlju prikazani su različiti modeli deformisanja sa stanovišta oblika uzoraka i materijala, koji su primenjivani za definisanje dijagrama granične deformabilnosti. Zajedničko za većinu prikazanih modela je promenljiva vrednost pokazatelja naponskog stanja u toku procesa deformisanja. Zbog toga se kod primene ovih modela u svrhu definisanja DGD-a u obzir mora uzeti istorija deformisanja. S obzirom na to da se u toku procesa deformisanja naponsko stanje drastično menja i često se iz pritiskog naponskog stanja prelazi u zatezno i obrnuto, neophodno je modifikovati ove modele deformisanja kako bi njihova primena dala tačnije rezultate. Cilj ove disertacije je da se kombinacijom različitih geometrija uzoraka i alata kao i triboloških uslova pronađu takvi modeli deformisanja koji će obezbediti proces deformisanja pri konstantnim vrednostima pokazatelja naponskog stanja.

2.4 PRIMENA NUMERIČKIH SIMULACIJA U OBLASTI DEFORMABILNOSTI MATERIJALA

Numerička analiza procesa zapreminskog deformisanja je svakodnevno prisutna u industriji. Opterećenja obradnog sistema koja se javljaju u procesu, tečenje materijala, naponsko-deformaciona stanja u radnim komadima se mogu predvideti numeričkom analizom i iskoristiti za pravilno projektovanja procesa obrade. Većina numeričkih analiza se bazira na metodi konačnih elemenata i inženjerima su dostupne u vidu velikog broja različitih softvera (Abaqus, SimufactForming, Deform...).

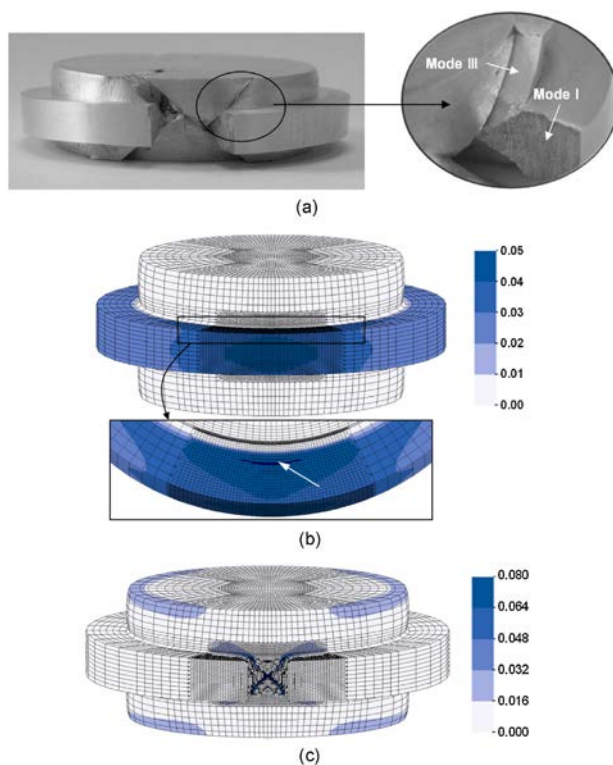
S obzirom na to da je u ovom radu prikazana uporedna analiza rezultata ostvarenih eksperimentalnim i numeričkim putem, u ovom poglavlju će biti prikazana neka od dostignuća u oblasti primene numeričkih simulacija hladnog zapreminskog deformisanja.

U radu [54] dat je prikaz numeričke analize sabijanja uzoraka različitih oblika, slika 2.22.



Slika 2.22 Početna geometrija uzoraka [54]

U istom radu, na primeru sabijanja cilindra s prstenom, autori su numeričkom analizom odredili mesto na uzorku s najvećom verovatnoćom pojave pukotine, slika 2.23.

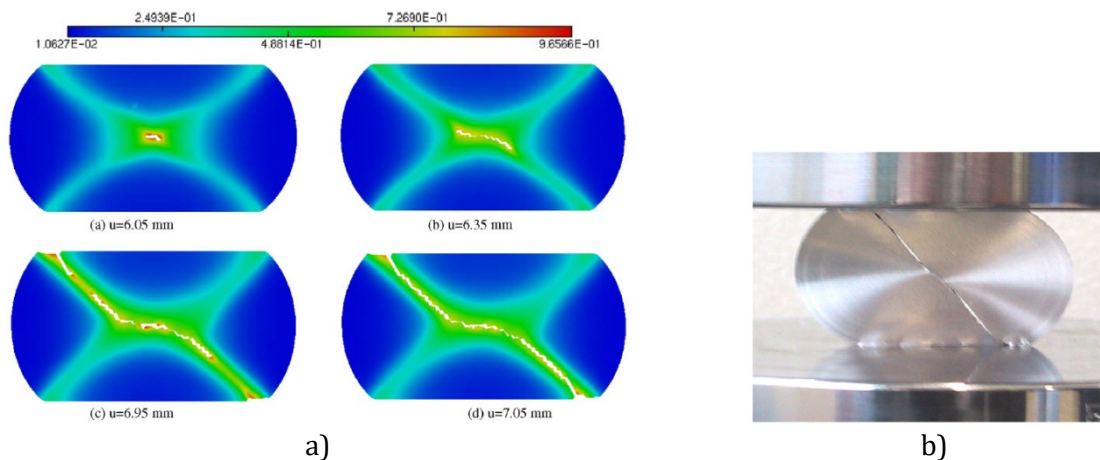


Slika 2.23 Mesto razaranja uzorka u eksperimentu (a) i simulaciji (b) [54]

Kao što je moguće videti na slici 2.23, simulacija pokazuje vrlo dobru saglasnost s eksperimentom, što u potpunosti opravdava njenu primenu.

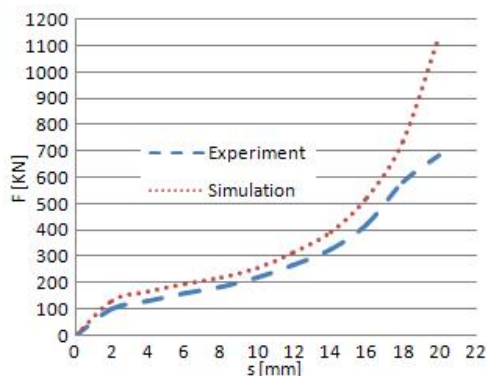
Slična istraživanja je sproveo Landre sa svojim saradnicima u radu [38]. Primenom numeričke simulacije autori su težili da odrede mesto na uzorku s najvećom verovatnoćom pojave pukotine. Rezultate ostvarene numeričkom analizom su potvrdili eksperimentom. Saanouni je u radu [52] primenom metode konačnih elemenata prikazao pojavu i propagaciju pukotine pri sabijanju položenog cilindra. Materijal na kom su ispitivanja vršena je bio aluminijum dok je za numeričku analizu primenjen softver ABAQUS. Na slici 2.24 je moguće videti nastanak i

propagaciju pukotine. Slika 2.24a prikazuje rezultate ostvarene simulacijom procesa, dok je uzorak nakon eksperimenta prikazan na slici 2.24b.



Slika 2.24 Nastanak i širenje pukotine u procesu sabijanja položenog cilindra ravnim alatima
a) numerička analiza, b) eksperimentalna analiza [52]

U radu [65] izvršena je numerička i eksperimentalna analiza sabijanja prizmatičnih uzoraka alatima V oblika. Za numeričku analizu, autori su koristili programski paket Simufact.Forming, a kao jedan od izlaznih rezultata je prikazan dijagram promene sile u zavisnosti od hoda alata, slika 2.25.



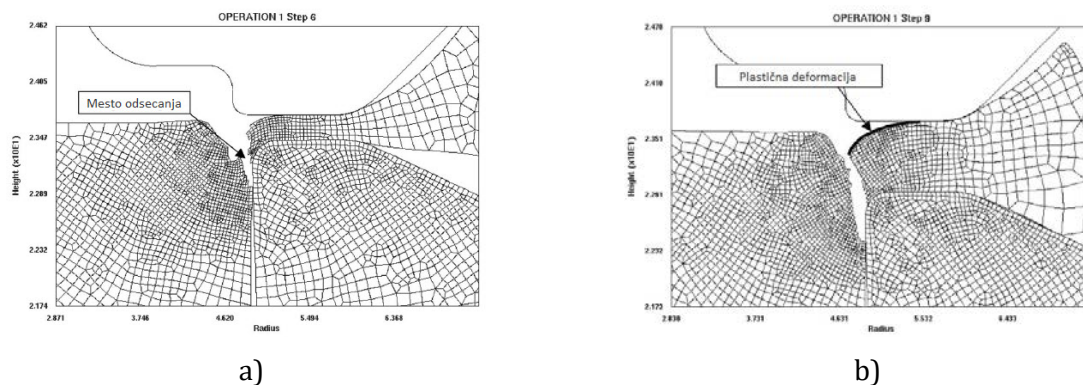
Slika 2.25 Dijagram sila – hod kod sabijanja prizmatičnih uzoraka alatima V oblika [65]

Uvidom u sliku 2.25 je moguće zaključiti da su razlike u vrednostima sile ostvarenih u simulaciji i eksperimentu u toku procesa deformisanja (s od 0 do 18 mm) minimalne, što dokazuje da je upotreba numeričke analize u oblasti deformisanja u potpunosti opravdana. Međutim, primećuje se da je na samom kraju procesa (s od 18 do 20mm) sila ostvarena u eksperimentu manja nego sila ostvarena u simulaciji, ali uzrok tome može biti pojava pukotina i pucanje uzorka na lateralnoj površini u eksperimentu, dok simulacijom nisu ispitivani kriterijumi loma pa nije bilo moguće na taj način odrediti mesto i trenutak pojave pukotine.

U radu [78] autori su upotrebom komercijalnog softvera Deform 2D vršili ispitivanja pojave loma s ciljem produženja veka trajanja alata za odsecanje venca nakon procesa kovanja. Naime, cilj je ostvariti što manji hod držača obratka kako bi se smanjilo njegovo opterećenje, a s druge strane, sa smanjenjem hoda držača povećava se poprečni presek rezne linije, pa je sila potrebna za odsecanje veća. Simulacije su vršene u cilju određivanja optimalnog hoda pri kom bi se

proces razdvajanja uspešno izvršio uz što duži radni vek alata, korišćenjem optimalne sile i dobijanja zadovoljavajućeg kvaliteta rezne ivice.

Na slici 2.26 prikazane su simulacije dva različita hoda držača obratka, na kojima je vidljivo da se veći kvalitet reza postiže pri manjem hodu. Sila koja se ostvaruje u procesu pri manjem hodu držača je 17.74kN, što je sa stanovišta opterećenja alata zadovoljavajuće.



Slika 2.26 Kvalitet rezne površine a) pri većem i b) manjem hodu držača [78]

S razvojem računarske tehnologije primena numeričkih metoda u procesima deformisanja uzima sve više maha. To dokazuje i veliki broj istraživanja koja se sprovode poslednjih godina kao i razvoj velikog broja specijalizovanih softvera. Na osnovu do sada analiziranih radova moguće je zaključiti da se numeričkim simulacijama vrlo uspešno može predvideti oštećenje (lom) materijala, što umnogome olakšava posao tehnolozima i inženjerima. Takođe, u oblasti deformabilnosti materijala moguće je odrediti naponsko-deformaciono stanje, ispratiti istoriju deformisanja i finalno odrediti položaj procesa na dijagramu granične deformabilnosti.

3. IDENTIFIKACIJA POKAZATELJA NAPONSKOG STANJA

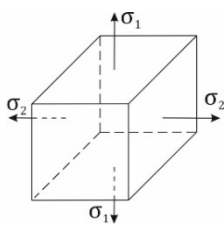
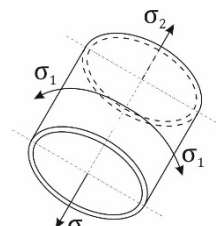
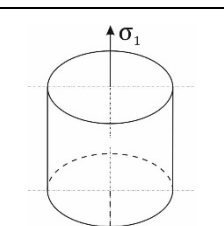
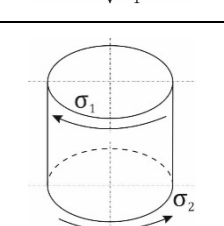
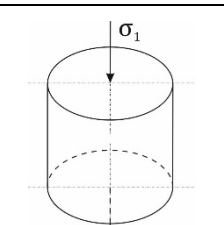
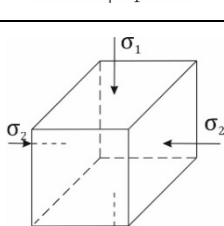
Naponsko stanje bilo koje tačke opterećenog tela je u potpunosti opisano tenzorom napona s devet, odnosno uzimajući u obzir stav o konjugovanosti tangencijalnih napona, sa šest naponskih komponenti. Uticaj komponenti napona na vrednost granične deformacije izražava se preko pokazatelja naponskog stanja koje je definisano odnosom prve invarijante tenzora napona i druge invarijante devijatora tenzora napona. Za određivanje konkretnih vrednosti pokazatelja naponskog stanja u okviru pojedinih tehnoloških metoda neophodno je poznavati intenzitet i karakter dejstva svih komponenti lokalnog naponskog stanja, tj. naponskog stanja na mestu pojave oštećenja na uzorku. Identifikacija naponskog stanja može biti relativno jednostavna kada se radi o šemama glavnih normalnih napona. U tom slučaju za definisanje β faktora se koriste samo tri naponske komponente odnosno tri glavna napona $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

U području zapreminskog deformisanja prisutno je nekoliko modela deformisanja na osnovu čijih naponskih šema je moguće odrediti konkretne vrednosti pokazatelja naponskog stanja. Ovi modeli deformisanja predstavljaju monotone procese čije vrednosti pokazatelja naponskog stanja ostaju nepromenjene u toku procesa deformisanja. S obzirom na to da je teško ostvariti monotone procese deformisanja, za prvu aproksimaciju oblika krive granične deformabilnosti su korišćeni modeli jednoosnog zatezanja, jednoosnog sabijanja i čistog uvijanja. Kod monotoni procesa deformisanja jednostavno je odrediti naponsko stanje, pa su ovi modeli služili kao osnova za definisanje krive granične deformabilnosti.

3.1 MONOTONI PROCESI DEFORMISANJA

Pri obradi metala deformisanjem naponsko stanje se menja u toku procesa, i nije isto u svim tačkama tela u jednom određenom trenutku. U toku procesa se u pojedinim zonama tela menjaju pravci glavnih osa napona i deformacije. Zbog toga je pogodno uvesti pojam male deformacije, odnosno, deformacije na maloj etapi deformisanja [15]. Sabiranjem većeg broja uzastopnih malih deformacija dolazi se do vrednosti velike, odnosno ukupne deformacije. Da bi se ukupna deformacija mogla dobiti na taj način, neophodno je da tok procesa bude jednoznačno određen, što znači da proces mora da se odvija monotono [15].

Tabela 3.1 Monotoni modeli deformisanja

Model deformisanja	Naponsko stanje	Srednji napon	Efektivni napon	β faktor
Ravnomerno dvoosno zatezenje	 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ $\sigma_3 = 0$	$\sigma_{sr} = \frac{2\sigma}{3}$	$\sigma_e = \sigma$	$\beta = +2$
Deformisanje tankozidne cevi opterećene unutrašnjim pritiskom	 $\sigma_1 = \sigma$ $\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{\sigma}{2}$ $\sigma_3 = 0$	$\sigma_{sr} = \frac{\sigma}{2}$	$\sigma_e = \sqrt{3} \frac{\sigma}{2}$	$\beta = +\sqrt{3}$
Jednoosno zatezanje	 $\sigma_1 = \sigma$ $\sigma_3 = \sigma_2 = 0$	$\sigma_{sr} = \frac{\sigma}{3}$	$\sigma_e = \sigma$	$\beta = +1$
Čisto uvijanje	 $\sigma_1 = \sigma$ $\sigma_2 = -\sigma$ $\sigma_3 = 0$	$\sigma_{sr} = 0$	$\sigma_e = \sqrt{3}\sigma$	$\beta = 0$
Jednoosno sabijanje	 $\sigma_1 = -\sigma$ $\sigma_3 = \sigma_2 = 0$	$\sigma_{sr} = -\frac{\sigma}{3}$	$\sigma_e = \sigma $	$\beta = -1$
Ravnomerno dvoosno sabijanje	 $\sigma_1 = \sigma_2 = -\sigma$ $\sigma_3 = 0$	$\sigma_{sr} = -\frac{2\sigma}{3}$	$\sigma_e = -\sigma$	$\beta = -2$

Ukoliko se u toku procesa deformisanja ma koje dve tačke posmatrane zapremine približavaju ili udaljavaju jedna od druge, a da pri tome deformaciona šema ostane nepromenjena, proces je

monoton. Za razliku od nemonotonih procesa, kod kojih pravci glavnih osa deformacija menjaju svoj položaj u odnosu na glavne ose napona, kod monotoni procesa deformisanja pravci glavnih osa napona i deformacija se poklapaju [15].

Za ostvarivanje monotoni procesa deformisanja, prema Devedžiću [15] neophodno je da budu ispunjena dva uslova:

- Materijalno vlakno posmatranog elementa koje se u određenoj fazi procesa najbrže deformiše (izdužuje ili skraćuje), najbrže se deformisalo i u svim prethodnim fazama. U tom slučaju glavne ose brzina deformacija moraju tokom čitavog procesa da se poklapaju s istim materijalnim vlaknima. Drugim rečima, pravac vlakna koje najbrže menja svoju dužinu poklapa se s pravcem najvećeg ukupnog izduženja.

- Glavne komponente brzine deformisanja mogu u toku procesa da se menjaju, ali se odnos između njih mora održati stalnim, odnosno ove komponente se moraju menjati proporcionalno jednom opštem parametru.

U slučaju malih deformacija, proces se smatra monotoni.

Sa stanovišta naponskog stanja, monotoni procesi deformisanja su oni procesi kod kojih pokazatelj naponskog stanja β ostaje konstantan u toku procesa. Zbog uticaja mnogobrojnih faktora, u praksi je to vrlo teško ostvariti [76, 74, 2].

U tabeli 3.1 dat je prikaz modela deformisanja čije su vrednosti pokazatelja naponskog stanja u idealnim uslovima konstanta.

Predmet istraživanja disertacije predstavljaju monotoni procesi deformisanja, a cilj je njihova primena za definisanje dijagrama granične deformabilnosti.

Kombinacijom određenih faktora materijala i obradnog sistema moguće je ostvariti monotoni proces deformisanja. Međutim, ukoliko dođe do minimalnih promena određenih uticajnih faktora, proces može postati nemonotoni.

3.2 POKAZATELJ NAPONSKOG STANJA KOD MONOTONIH PROCESA DEFORMISANJA

U ovom poglavlju će biti obrađeni monotoni procesi deformisanja prikazani u tabeli 3.1.

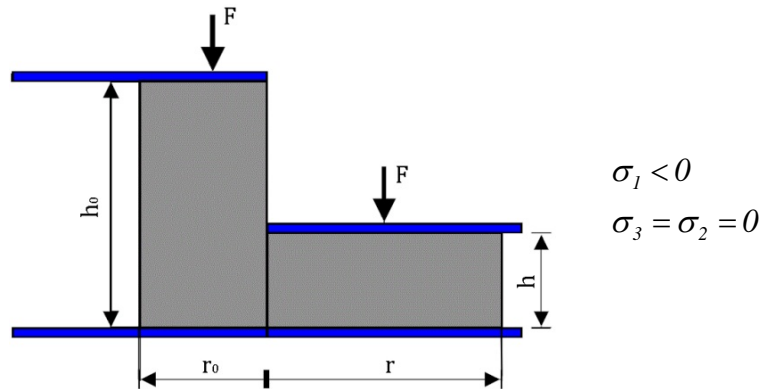
3.2.1. JEDNOOSNO SABIJANJE

U slučaju jednoosnog sabijanja valjka (slika 3.1), nema trenja na kontaktnim površinama alata i uzorka, pa u tom slučaju postoje samo glavni naponi, dok tangencijalnih napona nema.

U ovom slučaju sledi:

$$\sigma_1 = \sigma_e; \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (3.1)$$

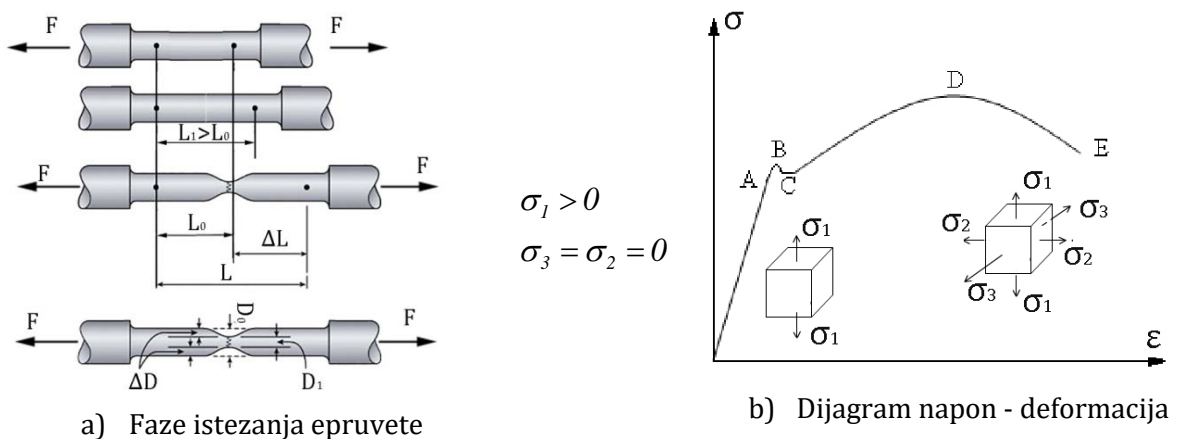
$$\beta = \frac{-\sigma_1}{\frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{2\sigma_1^2}} = -1 = const. \quad (3.2)$$



Slika 3.1 Jednoosno sabijanje valjka

3.2.2. JEDNOOSNO ZATEZANJE

Jednoosno zatezanje predstavlja model deformisanja kod kog pokazatelj naponskog stanja ima pozitivnu vrednost. Ovim testom deformabilnost materijala se ispituje do momenta pojave lokalizacije deformacija. Na slici 3.2a dat je prikaz epruvete koja se koristi za ispitivanje zatezanjem kao i mesto lokalizacije deformacija, dok je na slici 3.2b prikazan dijagram napona – deformacija kao i naponsko stanje u toku zatezanja epruvete. Na dijagramu do tačke „A“ javlja se elastična deformacija, dok je naponsko stanje jednoosno, a od tačke „D“ počinje lokalizacija deformacija i troosno naponsko stanje.



Slika 3.2 Epruveta za ispitivanje zatezanjem

Primenom jednačine 2.10 dolazi se do vrednosti pokazatelja naponskog stanja za slučaj jednoosnog zatezanja:

$$\sigma_1 = \sigma_e; \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (3.3)$$

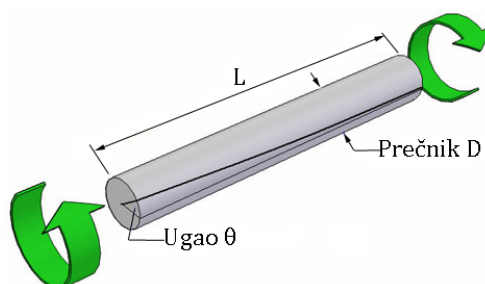
$$\beta = \frac{\sigma_1}{\sigma_e} = +1 = const. \quad (3.4)$$

Pojava lokalizacije pri aksijalnom zatezanju praćena je pojavom oštećenja strukture u unutrašnjosti epruvete, dok je pokazatelj naponskog stanja za slučaj lokalizovanog deformisanja

$\beta > +1$. Trenutak pojave lokalizacije predstavlja kraj stabilnog deformisanja i može se smatrati kriterijumom deformabilnosti materijala. Granična deformacija u tom slučaju jednaka je veličini ravnomerne deformacije, odnosno eksponentu deformacionog ojačavanja n pri vrednosti $\beta = +1$.

3.2.3. ČISTO UVIJANJE

Čisto uvijanje predstavlja vid deformisanja materijala (slika 3.3) pri nultoj vrednosti pokazatelja naponskog stanja β , što se može utvrditi na osnovu naponskog stanja.



Slika 3.3 Epruveta za ispitivanje čistim uvijanjem

Tenzor napona i efektivna deformacija u slučaju torzije imaju sledeći oblik:

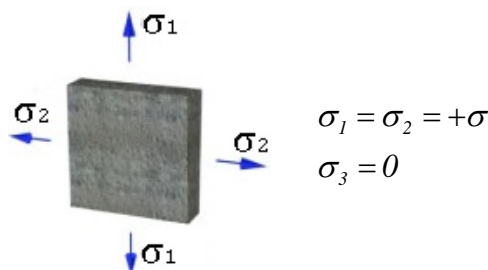
$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sigma_e / \sqrt{3} \\ 0 & 0 & 0 \\ \sigma_e / \sqrt{3} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \varphi_e = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{D \cdot \vartheta}{2L} \quad (3.5)$$

Vrednost hidrostatičkog napona jednaka je nuli, pa sledi da je pokazatelj naponskog stanja $\beta = 0$. Deformacionu šemu u slučaju čistog uvijanja karakteriše postojanje dve komponente deformacije, iste veličine, a suprotnog znaka $\varphi_1 = -\varphi_2$. Čisto uvijanje se često primenjuje za određivanje obradivosti materijala, a pri tome se ostvaruju značajne vrednosti stepena deformacije koje premašuju vrednosti deformacija jednoosnog zatezanja [60].

Na osnovu vrednosti pokazatelja naponskog stanja uočava se da su modeli jednoosnog sabijanja i jednoosnog zatezanja simetrično raspoređeni u odnosu na test čistog uvijanja, što omogućava definisanje krive granične deformacije u području $-1 \leq \beta \leq +1$.

3.2.4. RAVNOMERNO DVOOSNO ZATEZANJE

Primena osnovnih modela deformisanja pri određivanju dijagrama granične deformabilnosti ne predstavlja problem, jer je pokazatelj naponskog stanja već unapred poznat. U monografiji [73] autor je naveo da se pored primene osnovnih modela deformisanja za definisanje dijagrama granične deformabilnosti može koristiti i model ravnomernog dvoosnog zatezanja. U slučaju ovog modela deformisanja moguće je ostvariti gornju granicu β faktora u vrednosti od +2 koja je interesantna za izučavanje deformabilnosti materijala. U idealnim uslovima za ovaj model deformisanja bi se trebalo postići monotono deformisanje. Na slici 3.4 je dat šematski prikaz naponskog stanja kod ravnomernog dvoosnog zatezanja.



Slika 3.4 Naponsko stanje kod ravnomernog dvoosnog zatezanja

Uzimajući u obzir da je $\sigma_3=0$ dok su druga dva napona jednaka $\sigma_1=\sigma_2=\sigma$, moguće je računski dokazati da je vrednost pokazatelja naponskog stanja u slučaju dvoosnog zatezanja +2.

Ukoliko se prethodno iznete konstatacije uvrste u izraz za efektivni napon, sledi:

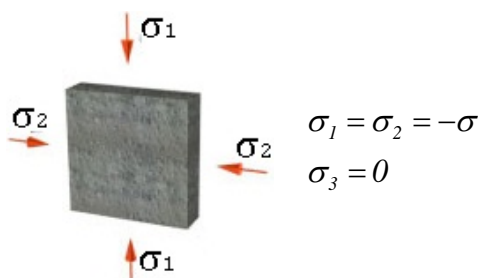
$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} = \sqrt{\sigma^2} = +\sigma \quad (3.6)$$

Uzimajući u obzir već usvojenu konstataciju, da se u slučaju sabijanja javljaju negativni, a u slučaju zatezanja pozitivni naponi, iz prethodne jednačine se može zaključiti da je pri dvoosnom zatezanju $\sigma_e=+\sigma$. U tom slučaju sledi:

$$\beta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e} = \frac{2\sigma}{+\sigma} = +2 = const. \quad (3.7)$$

3.2.5. RAVNOMERNO DVOOSNO SABIJANJE

Za definisanje dijagrama granične deformacije moguće je koristiti i model ravnomernog dvoosnog sabijanja [73]. Kao i u slučaju ravnomernog dvoosnog zatezanja i kod ovog modela bi, prema teoriji, trebalo da se ostvari monotno deformisanje. Šematski prikaz naponskog stanja za ovaj model deformisanja je prikazan na slici 3.5.



Slika 3.5 Naponsko stanje kod ravnomernog dvoosnog sabijanja

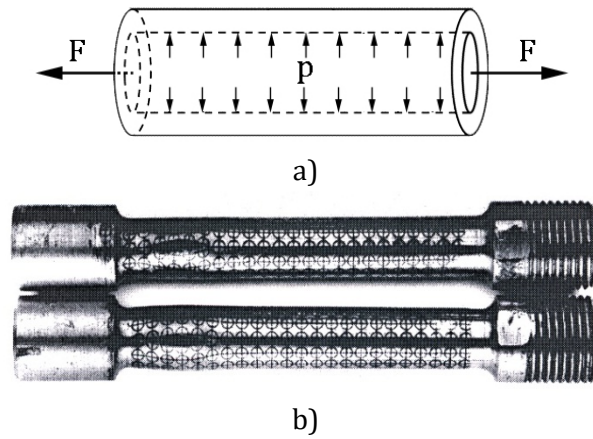
Uzimajući u obzir da su naponi jednaki $\sigma_1=\sigma_2=-\sigma$, a da je $\sigma_3=0$, moguće je izvesti sledeći zaključak:

$$\beta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e} = \frac{-2\sigma}{\sigma} = -2 = const. \quad (3.8)$$

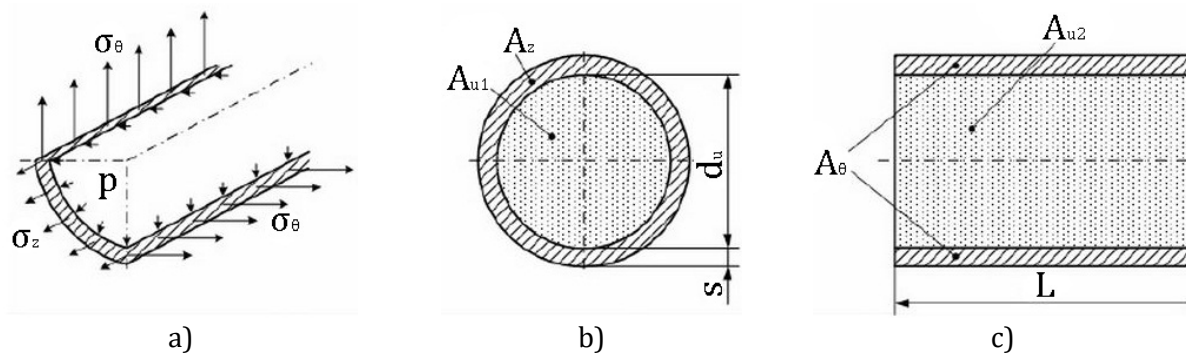
Kao što je već napomenuto, kod ovog modela je u idealnim uslovima obrade moguće ostvariti monoton proces deformisanja.

3.2.6. DEFORMISANJE TANKOZIDNE CEVI

U radu [73] je prikazan model deformisanja tankozidne cevi opterećene unutrašnjim pritiskom. Na slici 3.6a je prikazana šema procesa deformisanja tankozidne cevi, dok je na slici 3.6b dat izgled uzoraka nakon procesa deformisanja.



Slika 3.6 Tankozidna cev nakon procesa deformisanja [73]



Slika 3.7 Smer delovanja napona σ_θ i σ_z (a), površina poprečnog preseka zida cevi (b), površina uzdužnog preseka zida cevi (c)

Prilikom izvođenja eksperimenta deformisanja tankozidne cevi na jednu stranu cevi se nareže navoj preko kog se epruveta povezuje s hidrauličnom instalacijom, preko koje se ostvaruje pritisak u unutrašnjosti cevi. Pritisak u cevi se postepeno povećava dok ne dođe do pojave pukotine na spoljnoj površini. Kako bi se izračunale glavne deformacije, potrebno je odrediti lokalne deformacije na mestu pojave pukotine. Zbog toga se na spoljašnju površinu epruvete nanosi merna mrežica koja se može uočiti na slici 3.6. Delovanje napona unutar zidova cevi je prikazano na slici 3.7.

Prema slici 3.7 moguće je odrediti komponente napona na sledeći način:

$$\sigma_z = \frac{p \cdot d_u \cdot L}{\frac{\pi}{4} \left((d_u + 2 \cdot s)^2 - d_u^2 \right)} \quad (3.9)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p \cdot d_u}{2 \cdot s} \quad (3.10)$$

Odnos dve komponente se može napisati u sledećem obliku:

$$\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_z} = \frac{\frac{p \cdot d_u}{2 \cdot s}}{\frac{p \cdot d_u \cdot L}{\frac{\pi}{4} \left((d_u + 2 \cdot s)^2 - d_u^2 \right)}} = \frac{2 \cdot (d_u + s)}{d_u} \quad (3.11)$$

Ukoliko se pretpostavi da je debljina zida cevi s približno jednaka nuli, moguće je izvesti zaključak da je komponenta normalnog napona σ_z duplo manja od tangencijalne komponente σ_{θ} , odnosno:

$$\sigma_z = \frac{\sigma_{\theta}}{2} \quad (3.12)$$

Uzimajući taj odnos u obzir moguće je napisati izraz za efektivni napon u obliku:

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_{\theta} \quad (3.13)$$

Primenom izraza za normalni, tangencijalni i efektivni napon u formuli za izračunavanje pokazatelja naponskog stanja sledi:

$$\beta = \frac{\sigma_z + \sigma_{\theta} + \sigma_r}{\sigma_e} = +\sqrt{3} = const. \quad (3.14)$$

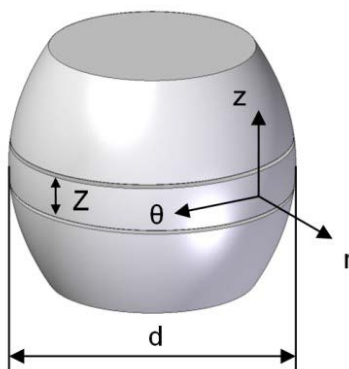
Za konkretan slučaj prikazan u radu [73] pokazatelj naponskog stanja u vrednosti od $+\sqrt{3}$ je ostvaren pri graničnoj deformaciji $\varphi_e^g=0,07$.

Model deformisanja tankozidne cevi, predstavlja još jedan model monotnog deformisanja.

3.3 POKAZATELJ NAPONSKOG STANJA U PROCESIMA SLOBODNOG SABIJANJA VALJKA ALATIMA RAZLIČITIH OBLIKA

Za definisanje dijagrama granične deformabilnosti često se koristi proces slobodnog sabijanja valjka. Međutim, usled pojave trenja na kontaktnim površinama, praktično je nemoguće ostvariti monoton proces deformisanja. U slučaju nemonotonih procesa pokazatelj naponskog stanja je promenljiv, pa je za identifikaciju naponskog stanja neophodno u obzir uzeti promene β faktora pri konačnom definisanju procesa slobodnog sabijanja valjka na dijagramu granične deformabilnosti.

Za određivanje β faktora neophodno je identifikovati naponsko-deformaciono stanje u zoni nastanka prvih pukotina u materijalu. Međutim, komponente napona i deformacija u opštem slučaju nije jednostavno odrediti čak ni u ograničenom delu zapremine, pa se za rešavanje ovog problema koristi primenjena teorija plastičnog deformisanja kao i informacije koje se prikupljaju izvođenjem eksperimentalnih istraživanja.



Slika 3.8 Cilindar nakon deformacije [64]

Identifikacija naponskog stanja u zoni pojave pukotine kod deformisanja cilindričnih uzoraka je olakšana jer se radi o ravanskom naponskom stanju. Prve pukotine se javljaju na spoljašnjoj površini uzorka (slika 3.8), u takozvanom ekvatorijalnom pojasu spoljašnje površine uzorka. S obzirom na to da je spoljašnja površina slobodna, komponenta radijalnog napona σ_r je jednaka nuli, pa se može zaključiti da je osa r osa glavnog napona. Pravac određen osom θ takođe predstavlja pravac glavnog normalnog napona jer se smatra da je tečenje materijala simetrično u odnosu na osu z koja predstavlja treći pravac glavnih normalnih napona.

Efektivni napon je definisan drugom invarijantom tenzora napona preko izraza 3.15, [71]:

$$\sigma_e = \sqrt{3 \cdot |J_{D2}|} \quad (3.15)$$

Druga invarijanta tenzora napona J_2 se u razvijenom obliku može napisati kao [71]:

$$J_{D2} = \frac{1}{6} \left[(\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 \right] \quad (3.16)$$

Kada se izraz za drugu invarijantu tenzora napona uvrsti u izraz za efektivni napon, a da se pri tome poštuje konstatacija da je radijalni napon $\sigma_r=0$, sledi:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_z^2 - \sigma_\theta \cdot \sigma_z} \quad (3.17)$$

U području plastičnog tečenja veza između naponsko-deformacionih komponenti definisana je teoremom Levy-Misses-a, prema kojoj je devijator priraštaja plastičnih deformacija proporcionalan devijatoru napona [15]:

$$D_{d\varphi}^p = d\lambda \cdot D_\sigma \quad (3.18)$$

Primenom ove jednačine za uslove slobodnog sabijanja valjka dobijaju se dve algebarske jednačine koje povezuju naponsko-deformacione komponente:

$$d\varphi_\theta = d\lambda \cdot (\sigma_\theta - \sigma_m) \quad (3.19)$$

$$d\varphi_z = d\lambda \cdot (\sigma_z - \sigma_m) \quad (3.20)$$

Ukoliko se obe jednačine izraze preko $d\lambda$, sledi:

$$\frac{d\varphi_\theta}{(\sigma_\theta - \sigma_m)} = \frac{d\varphi_z}{(\sigma_z - \sigma_m)} \quad (3.21)$$

Srednji normalni napon σ_m se definiše preko prve invarijante tenzora napona, a za ravansko naponsko stanje on ima oblik:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_\theta + \sigma_z + \sigma_r}{3} \quad (3.22)$$

S obzirom na to da je radijalna komponenta napona jednaka nuli, uvrštavanjem ovog izraza u izraz (3.21) sledi:

$$\alpha = \frac{d\varphi_\theta}{d\varphi_z} = \frac{2 \cdot \sigma_\theta - \sigma_z}{2 \cdot \sigma_z - \sigma_\theta} \quad (3.23)$$

Leva strana jednakosti ove jednačine se može označiti s α pa se odnos glavnih napona može napisati u sledećem obliku:

$$\frac{\sigma_\theta}{\sigma_z} = \frac{1 + 2 \cdot \alpha}{2 + \alpha} \quad (3.24)$$

Kombinacijom izraza za efektivni napon i za odnos glavnih napona moguće je izvesti izraze za glavne napone σ_θ i σ_z u sledećem obliku:

$$\sigma_\theta = \sigma_z \left(\frac{1 + 2 \cdot \alpha}{2 + \alpha} \right) \quad (3.25)$$

$$\sigma_z = \frac{\pm \sigma_e}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{1 + 2 \cdot \alpha}{2 + \alpha} \right) + \left(\frac{1 + 2 \cdot \alpha}{2 + \alpha} \right)^2 \right]}} \quad (3.26)$$

Pokazatelj naponskog stanja određen je izrazom:

$$\beta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e} = \frac{\sigma_\theta + \sigma_z}{\sigma_e} \quad (3.27)$$

Vrednost efektivne deformacije na mestu preseka ekvatorijalne ravni i slobodne površine uzorka u procesu slobodnog sabijanja valjka određuje se na osnovu izraza:

$$\varphi_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_\theta - \varphi_r)^2 + (\varphi_r - \varphi_z)^2 + (\varphi_z - \varphi_\theta)^2} \quad (3.28)$$

Drugačiji pristup problematici određivanja faktora pokazatelja naponskog stanja β , prikazan je u radu [4]. Naime, autori Alexandrov i Vilotić su srednju vrednost pokazatelja naponskog stanja β_{sr} određivali na osnovu deformacionih komponenti u trenutku pojave pukotine:

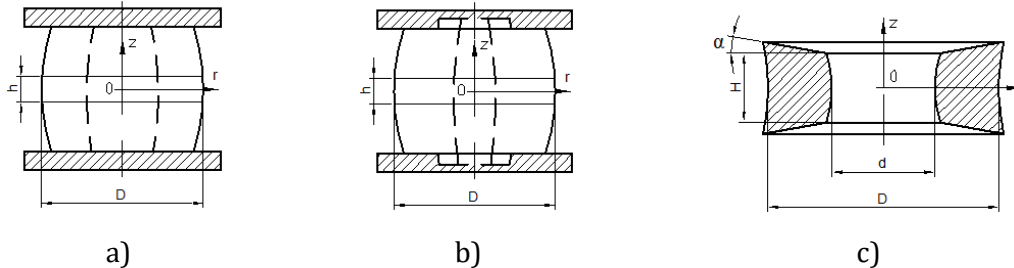
$$\beta_{sr} = \frac{2}{\varphi_e^g} (\varphi_1^g + \varphi_2^g) \quad (3.29)$$

gde su:

φ_1 i φ_2 – komponente glavnih logaritamskih deformacija,
 φ_{e^g} – efektivna deformacija u trenutku razaranja uzorka.

Za određivanje pokazatelja naponskog stanja autori su primenili tri različita testa sabijanja:

- sabijanje šupljeg valjka ravnim pločama (slika 3.9a);
- sabijanje šupljeg valjka izdubljenim pločama (slika 3.9b);
- sabijanje šupljeg valjka koničnim pločama (slika 3.9c).



Slika 3.9 Šematski prikaz procesa sabijanja šupljeg valjka: a) ravnim pločama, b) izdubljenim pločama, c) koničnim pločama [4]

Određivanje naponsko-deformacionog stanja pri sabijanju cilindra sferičnim alatima (slika 3.10) prikazano u radu [61] bazirano je na praćenju geometrije obratka. Eksperimentalno je ustanovljeno da se prve vidljive pukotine pojavljuju na spoljašnjoj površini uzorka kod ovog modela deformacije. Primena ovog modela omogućava da se u preseku ekvatorijalne ravni i slobodne površine uzorka, tj. na mestu pojave pukotine, generiše takvo naponsko-deformaciono stanje koje uslovljava visoku vrednost pokazatelja naponskog stanja, $\beta > 1$. Ispitivanja su vršena na uzorcima različitih dimenzija napravljenih od čelika Č 1431.



Slika 3.10 Sabijanje valjka sferičnim alatima: a) šema procesa, b) konfiguracija uzorka posle sabijanja [61]

Logaritamska deformacija u pravcu φ ose, u trenutku pojave pukotine na uzorku, može se jednostavno odrediti zbog simetričnosti obradaka, na osnovu sledeće jednačine:

$$\varphi_{\theta} = \ln \left(\frac{D_{max}}{D_i} \right) \quad (3.30)$$

gde je:

D_{max} – prečnik uzorka na ekvatorijalnom preseku u trenutku pojave pukotine,

D_i – početni prečnik uzorka.

Logaritamska deformacija u pravcu ose θ se određuje na osnovu procene da se oblik ispupčenja slobodne površine uzorka može opisati kružnim lukom:

$$\varphi_z = \ln \left(\frac{H_{max}}{H_i} \right) \quad (3.31)$$

Pri čemu je:

H_{max} – visina uzorka u trenutku nastanka pukotine,

H_i – početna visina uzorka.

Na osnovu uslova konstantnosti zapremine uzorka može se odrediti deformacija u pravcu r ose:

$$\varphi_r = -(\varphi_\theta + \varphi_z) \quad (3.32)$$

Koristeći izraze za određivanje komponenti glavnih deformacija određuje se efektivna deformacija φ_e :

$$\varphi_e = \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ \left[\ln \left(\frac{H_i}{H_{max}} \right) + \ln \left(\frac{D_i}{D_{max}} \right) \right]^2 + \left[\ln \left(\frac{D_{max}}{D_i} \right) \right]^2 + \left[\ln \left(\frac{H_{max}}{H_i} \right) \right]^2 \right\}} \quad (3.33)$$

Uzimajući u obzir granični uslov, vrednost radijalne komponente napona na slobodnoj površini uzorka je $\sigma_r=0$ i uslov konstantnosti zapremine, srednji hidrostatički napon σ_m je:

$$\sigma_m = -\frac{2}{3} \frac{\varphi_r}{\varphi_e} \cdot \sigma_e \quad (3.34)$$

Pokazatelj naponskog stanja β se može definisati izrazom:

$$\beta = -\frac{3\sigma_m}{\sigma_e} \quad (3.35)$$

Kada se ovaj izraz uvrsti u izraz 3.34, dobija se jednačina:

$$\beta = -\frac{2\varphi_r}{\varphi_e} \quad (3.36)$$

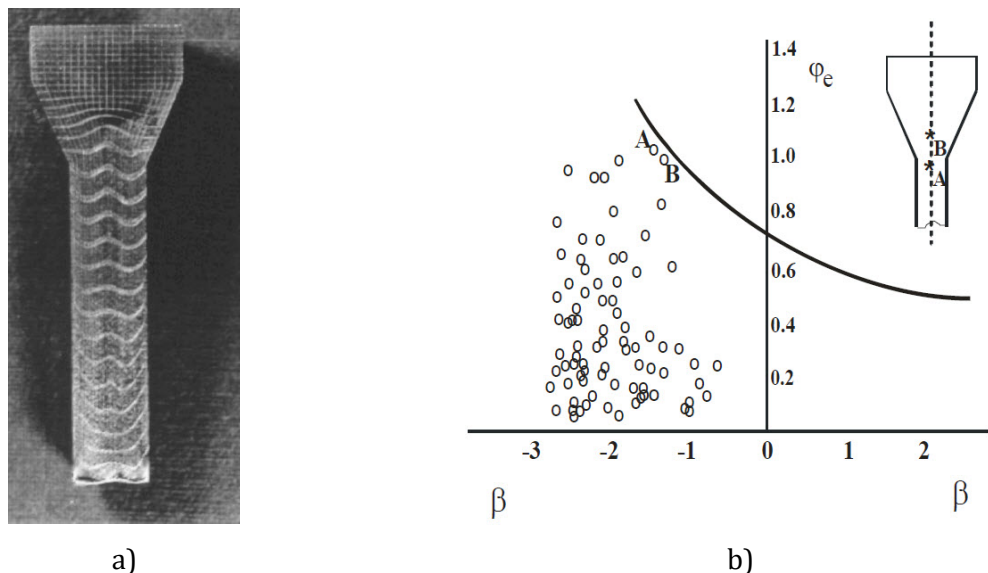
Vrednost pokazatelja naponskog stanja β u trenutku pojave pukotine na spoljašnjoj površini uzorka može biti određena primenom prethodnih jednačina, uz korišćenje eksperimentalnih podataka. Ovakav prilaz definisanja pokazatelja naponskog stanja β veoma je povoljan, jer ne zahteva identifikaciju naponskog stanja u tački nastanka pukotine na uzorku.

Na osnovu do sada prikazanih modela sabijanja cilindričnih uzoraka alatima različitih oblika moguće je zaključiti da se kombinacijom geometrije uzoraka i alata mogu postići različita naponska stanja u zoni pojave prvih pukotina na uzorku. Identifikacijom tih naponskih stanja moguće je definisati pokazatelj naponskog stanja β u širem području. Cilj ove disertacije je da se pronađu modeli deformisanja kod kojih će se postići takvo naponsko stanje koje će obezbediti konstantnu vrednost β faktora tokom procesa deformisanja.

3.4 POKAZATELJ NAPONSKOG STANJA ZA POJEDINE TEHNOLOŠKE METODE OBRADE DEFORMISANJEM

Za uspešno definisanje krive granične deformabilnosti u širem području pokazatelja naponskog stanja neophodno je koristiti različite modele deformisanja. Uzimajući u obzir zavisnost granične deformacije od tenzora napona, prilikom uvođenja novih modela deformisanja za definisanje dijagrama granične deformabilnosti potrebno je eksperimentalna istraživanja usmeriti ka određivanju naponsko-deformacionog stanja u kritičnoj zoni obratka. Jedino se poznavanjem naponsko-deformacionog stanja u kritičnoj zoni obratka mogu prikupiti neophodni podaci o pokazatelju naponskog stanja.

Položaj velikog broja konvencionalnih procesa obrade deformisanjem na dijagramu granične deformabilnosti nije strogo određen, jer se varijacijom određenih faktora direktno može uticati na naponsko stanje, odnosno na promenu pokazatelja naponskog stanja.



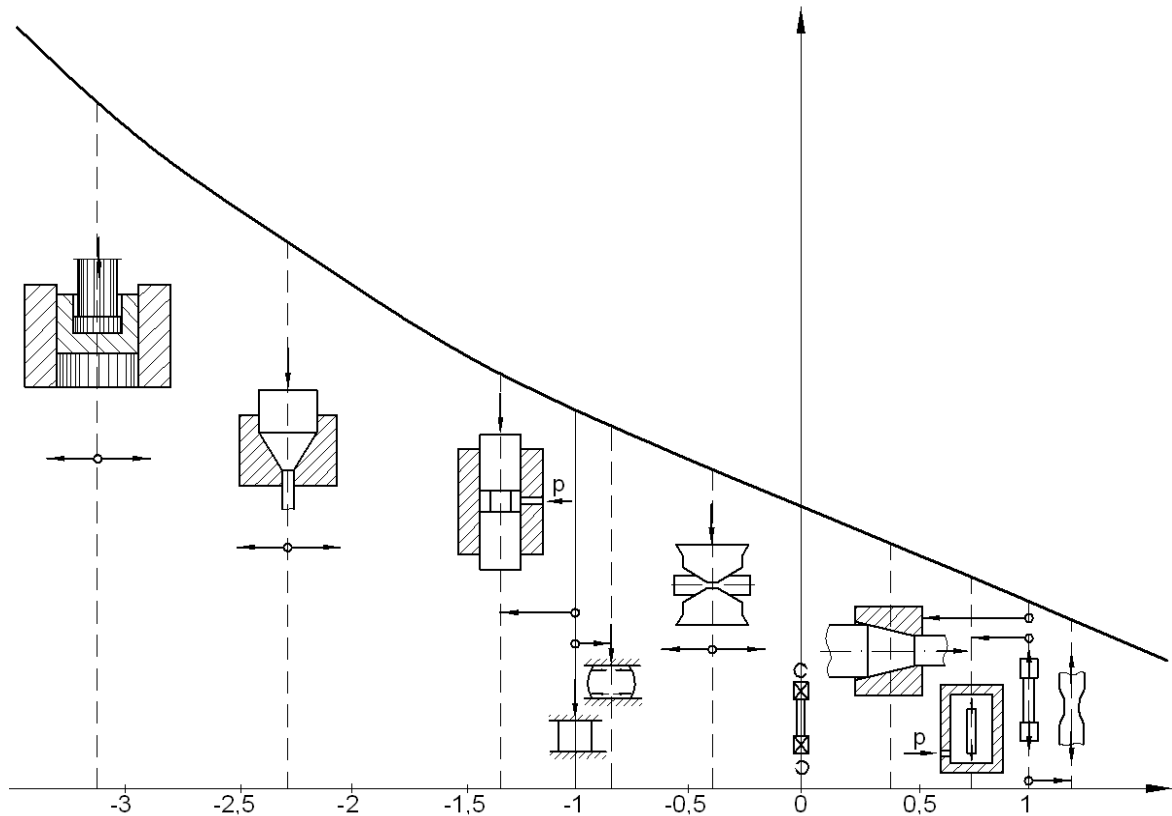
Slika 3.11 Uzorak nakon procesa deformisanja (a), položaj tačaka na poprečnom preseku radnog komada na DGD-u (b) [22]

U radu [22] je prikazano kako vrednosti pokazatelja naponskog stanja mogu biti različite usled promena u uslovima izvođenja procesa deformisanja u slučaju istosmernog istiskivanja. Autori su u ovom radu ispitivanja vršili na materijalu CuCrZr. Za merenje deformacija po zapremini radnog komada korišćena je metoda vizioplastičnosti, kod koje je tečenje materijala određeno na osnovu merne mreže nanosene na unutrašnjost uzorka. Dve polovine cilindra se spajaju (čineći jedan cilindričan uzorak) i zatim se vrši deformisanje. Nakon deformisanja polovine se razdvajaju i izmerena su pomeranja tačaka u mernoj mreži (slika 3.11a) kako bi se odredile deformacije.

Na uzorku su prepoznate dve tačke (A i B) koje predstavljaju kritične tačke u kojima dolazi do razaranja uzorka, slika 3.11b. Vrednosti pokazatelja naponskog stanja u ostalim tačkama uzorka su takođe računane i unete su u dijagram granične deformabilnosti (slika 3.11b). Na osnovu dijagrama se može zaključiti da je vrednost pokazatelja naponskog stanja raznolika, što znači da

je naponsko stanje u procesu promenljivo, odnosno da je vrednost pokazatelja naponskog stanja promenljiva, $\beta \neq const$.

Na slici 3.12 dat je orijentacioni prikaz položaja pojedinih modela deformisanja na dijagramu granične deformabilnosti, pri čemu je strelicama prikazana moguća promena pokazatelja naponskog stanja u zavisnosti od promene uslova obrade.

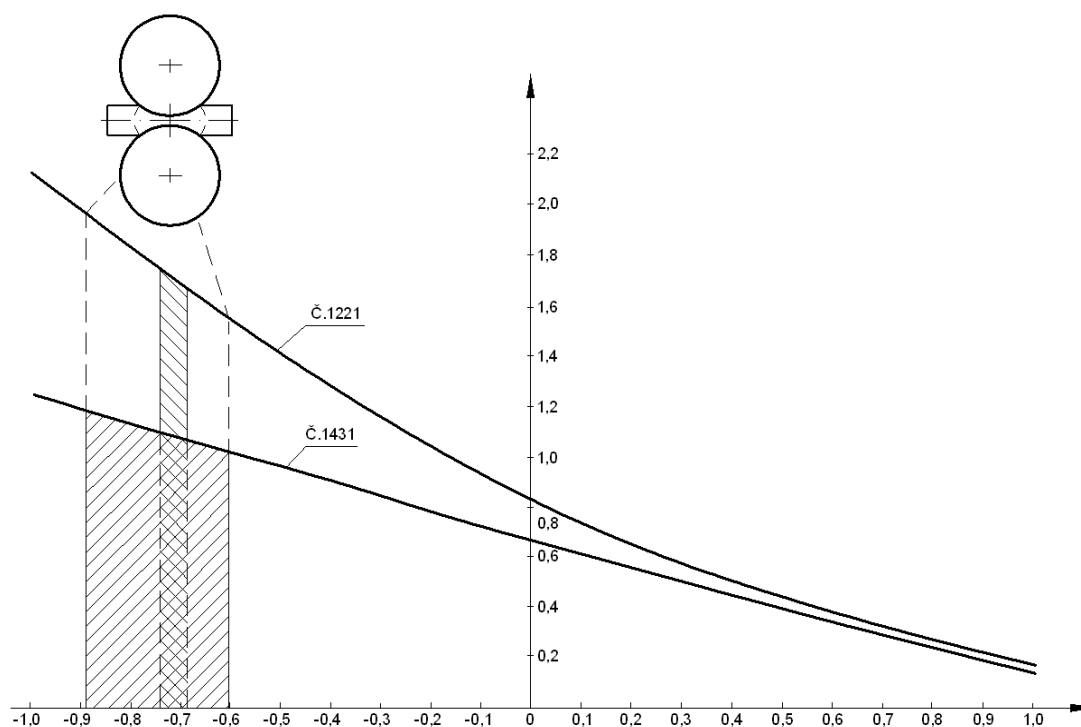


Slika 3.12 Položaj pojedinih modela deformisanja na dijagramu granične deformabilnosti [60]

U cilju identifikacije pokazatelja naponskog stanja u različitim procesima zapremnog deformisanja neophodno je sprovesti opsežna istraživanja. Definisane dijagrama granične deformabilnosti primenom monotonih procesa deformisanja bi bilo znatno tačnije, jer bi u tom slučaju za tačno definisane uslove obrade kao i geometrije uzoraka i alata vrednost pokazatelja naponskog stanja bila konstantna.

U [60] prikazan je model sabijanja polucilindričnim alatima. U ovom slučaju pokazatelj naponskog stanja se nalazi u granicama $-0,9 \leq \beta \leq -0,6$, slika 3.13. U ovom radu ispitivanja su vršena na materijalima Č1221 i Č1431. Naponsko stanje je određivano primenom različitih metoda: teorijski, eksperimentalno – metodom merne čivije i metodom vizioplastičnosti.

Položaji pojedinih modela hidrodeformisanja na dijagramu granične deformabilnosti su prikazani u [28]. Kod hidrodeformisanja cevi se u različitim zonama deformisanja generišu različita naponska stanja što direktno utiče na vrednosti pokazatelja naponskog stanja. U ovom radu prikazan je dijagram granične deformabilnosti u granicama $-4 \leq \beta \leq +2$.

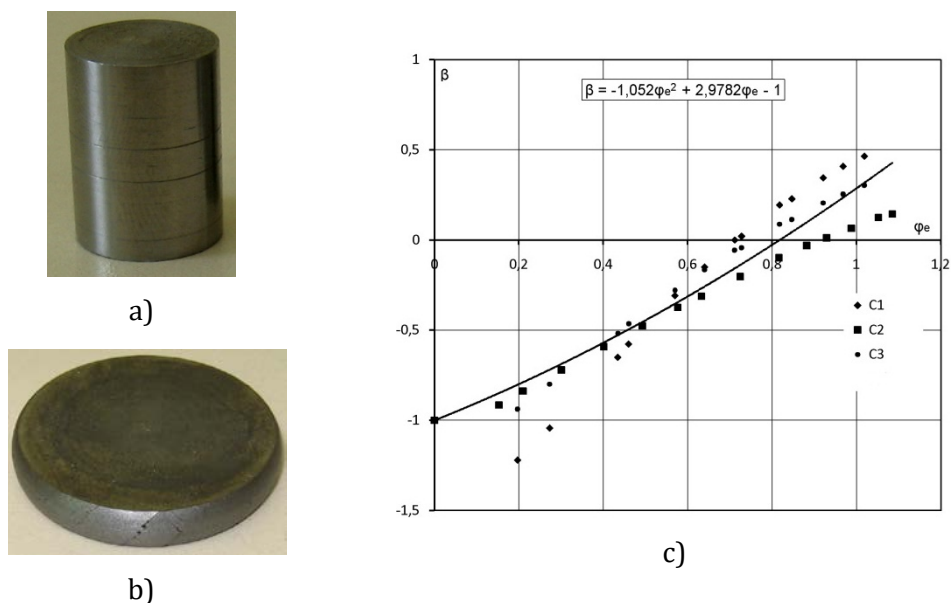


Slika 3.13 Opseg vrednosti pokazatelja naponskog stanja za slučaj sabijanja polucilindričnim alatima [60]

Bez obzira na pojedine aproksimacije pri definisanju položaja pojedinih modela deformisanja na dijagramu granične deformabilnosti, može se zaključiti da manje vrednosti pokazatelja naponskog stanja omogućuju veće granične deformacije i obrnuto. Smanjenjem pritiskih komponenti u naponskim šemama pojedinih modela deformisanja dolazi do smanjenja deformabilnosti, što dalje uslovljava opadajući tok krive granične deformabilnosti.

3.5 ISTORIJA POKAZATELJA NAPONSKOG STANJA

Značaj istorije pokazatelja naponskog stanja sadržan je u činjenici da se pri deformisanju u različitim naponskim uslovima javlja različit stepen oštećenja mikrostrukture materijala, koja ima kumulativan efekat na vrednost granične deformacije. U procesima zapreminskog deformisanja istorija pokazatelja naponskog stanja predstavlja se kao funkcija efektivne deformacije $\beta=f(\varphi_e)$. Samo u slučaju da se radi o monotonim procesima deformisanja nije potrebno detektovati promene naponskog stanja na mestu kritičnog oštećenja mikrostrukture materijala, jer u takvim okolnostima vrednost β faktora ostaje nepromenjena u toku obrade. Međutim, u nemonotonim procesima deformisanja promene lokalnog naponskog stanja se ne mogu izbeći tokom procesa. Kako je jedan od osnovnih ciljeva problematike deformabilnosti materijala uspešno prognoziranje trenutka nastanka nekog od oblika oštećenja strukture, pri definisanju DGD-a potrebno je uzeti u obzir uticaj istorije β faktora na veličinu efektivne granične deformacije. Funkcionalnu zavisnost $\beta=f(\varphi_e)$ je moguće odrediti eksperimentalno ili na osnovu rezultata numeričkih simulacija.

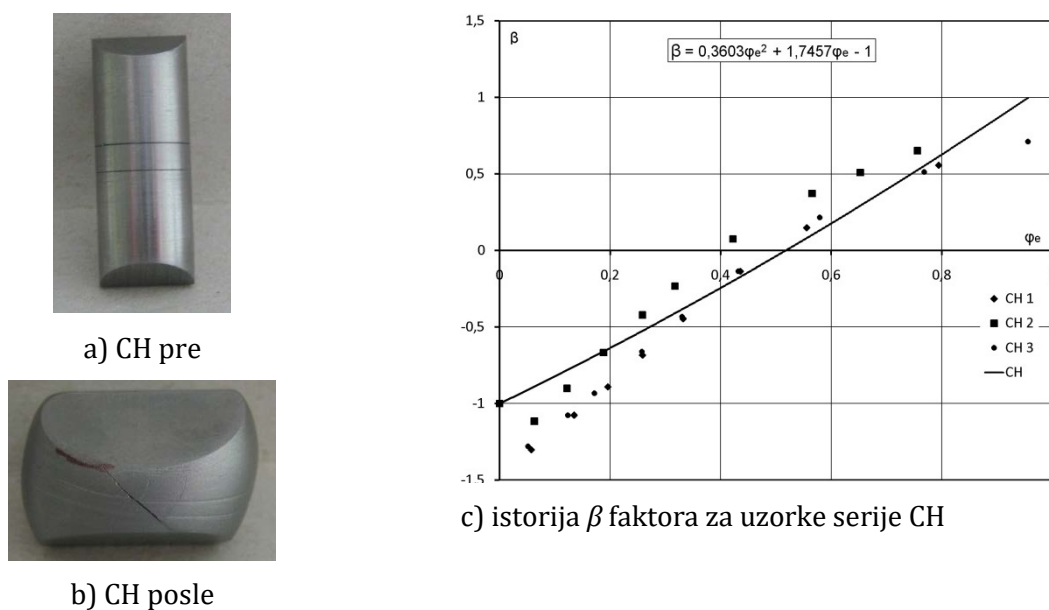


Slika 3.14 Prikaz istorije pokazatelja naponskog stanja pri slobodnom sabijanju valjka [65]

S aspekta praktične primene tehnologije plastičnog deformisanja može se konstatovati da promene naponskog stanja u toku obrade utiču na ponašanje materijala, što se oslikava preko karaktera uticaja istorije β faktora na mogućnost ispoljavanja potencijala deformabilnosti.

U radu [65] je dat prikaz određivanja pokazatelja naponskog stanja kao i zavisnost pokazatelja naponskog stanja od efektivne deformacije u slučaju sabijanja valjka ravnim pločama i sabijanja uzoraka alatima V oblika. Slika 3.14a predstavlja izgled uzorka pre deformisanja dok slika 3.14b predstavlja izgled uzorka nakon deformisanja. Istorije pokazatelja naponskog stanja u slučaju slobodnog sabijanja cilindra je prikazana na slici 3.14c.

U istom radu je prikazana i istorija pokazatelja naponskog stanja pri sabijanju uzoraka različite geometrije alatima V oblika, slika 3.15 – 3.17.



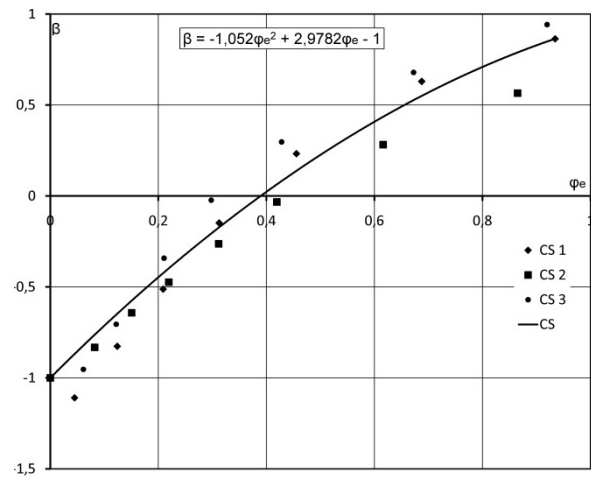
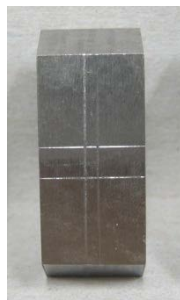
Slika 3.15 Sabijanje cilindra CH alatima V oblika [65]



a) CS pre



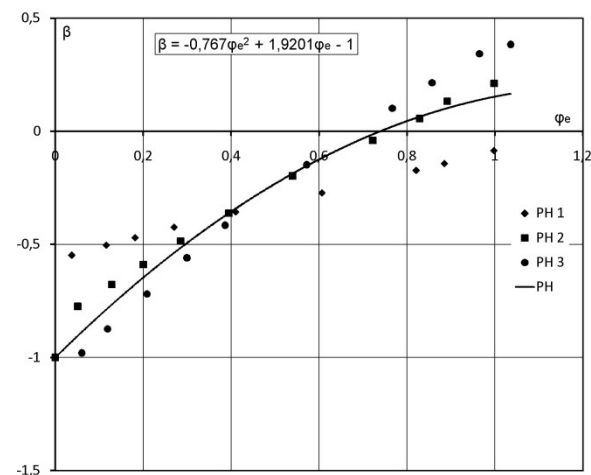
b) CS posle

Slika 3.16 Sabijanje cilindra CS alatima V oblika [65]

 c) istorija β faktora za uzorke serije CS


a) PH pre



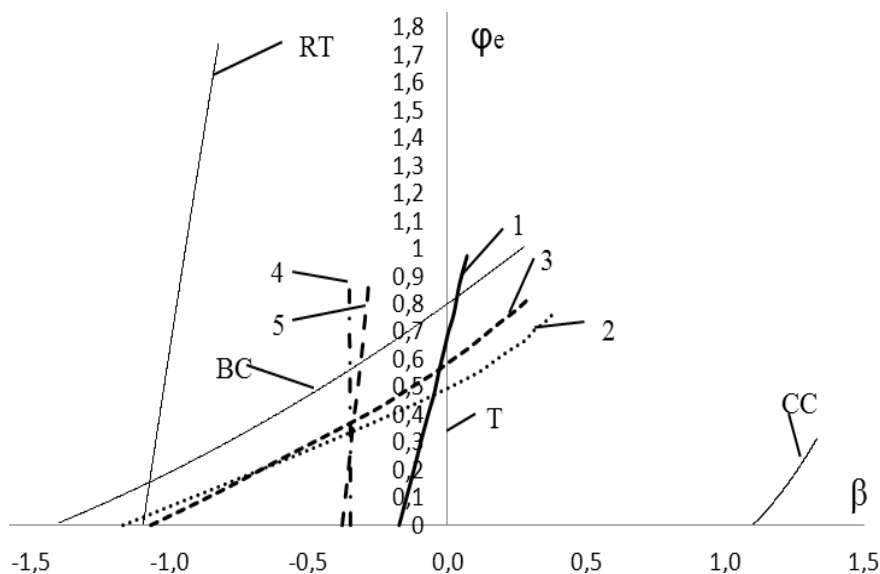
b) PH posle

Slika 3.17 Sabijanje prizmatičnih uzoraka PH alatima V oblika [65]

 c) istorija β faktora za uzorke serije PH

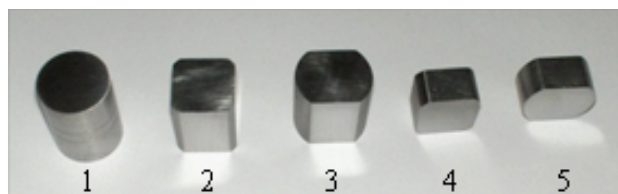
Uvidom u slike (od 3.15 do 3.17) uočava se da je naponsko stanje u uzorcima u toku procesa deformisanja promenljivo, odnosno, pokazatelj naponskog stanja β nije konstantan. Iz tog razloga, za izračunavanje granične deformacije, kao i primenu prikazanih modela deformisanja za određivanja dijagrama granične deformabilnosti je neophodno u obzir uzeti i istoriju deformisanja.

Ista metodologija definisanja granične deformacije i pokazatelja naponskog stanja za slučaj sabijanja uzoraka koji su osno nesimetrični je prikazana u radu [66]. Autori su koristili 5 tipova uzoraka za koje su odredili istoriju pokazatelja naponskog stanja. Pored tih modela autori su prikazali i istoriju β faktora za slučaj testa sabijanja cilindra, Rastegajev testa, testa čistog uvijanja i testa sabijanja cilindra s prstenom [64, 5, 59]. Zajednički dijagram istorije pokazatelja

naponskog stanja je prikazan na slici 3.18. Uzorci korišćeni za ispitivanja su prikazani na slici 3.19.

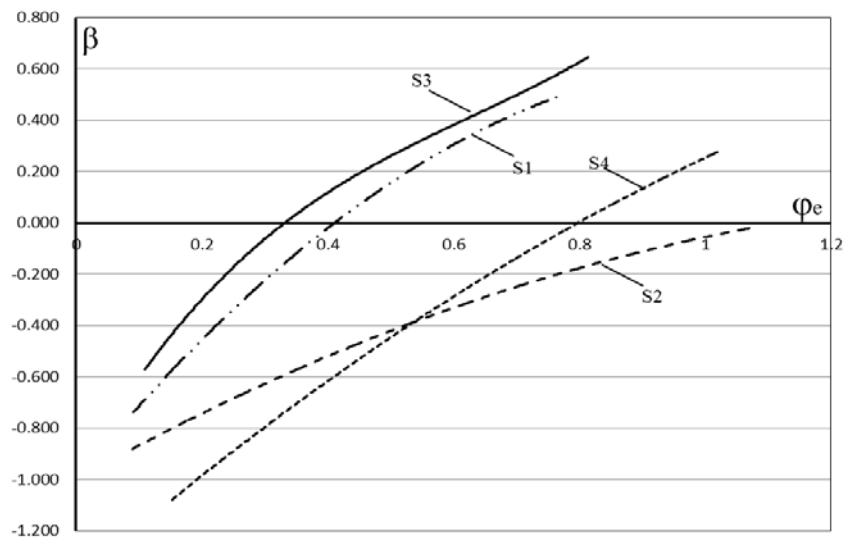


Slika 3.18 Istorija pokazatelja naponskog stanja [66]



Slika 3.19 Uzorci korišćeni za ispitivanja[66]

Analizom dijagrama prikazanog na slici 3.18 može se zaključiti da je od 9 prikazanih modela deformisanja jedino u slučaju modela 4 ostvaren monoton proces deformisanja. Ispitivanja su vršena na čeliku C45E (Č1531).

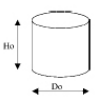


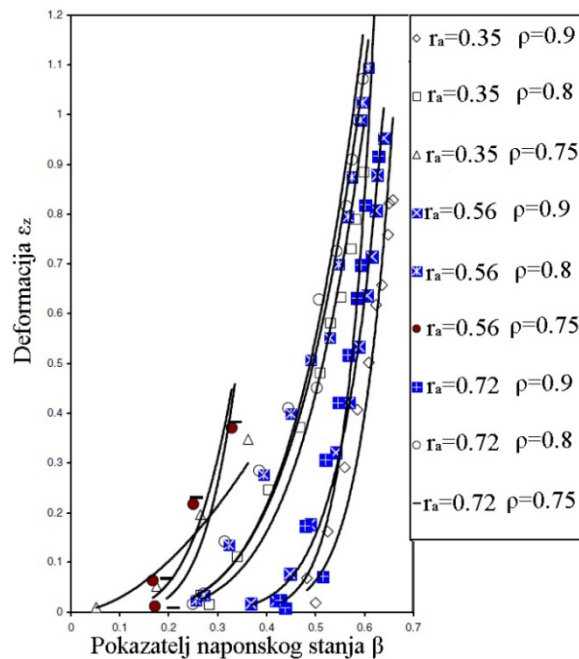
Slika 3.20 Istorija β faktora [26]

Utjecaji kontaktnog trenja kao i broja faza deformacije na istoriju pokazatelja naponskog stanja su prikazani u radu [26]. Za ispitivanja su korišćeni cilindrični uzorci istih polaznih dimenzija, dok je materijal uzoraka bio čelik C45E. Sabijanje je vršeno ravnim alatima uz različite vrednosti koeficijenta trenja (sa i bez podmazivanja). Takođe je vršeno inkrementalno sabijanje uzoraka s različitim vrednostima deformacionog inkrementa ($\varphi_h=0,05$ i $\varphi_h=0,1$). Dijagram istorije β faktora je prikazan na slici 3.20.

Uzorci S1 i S3 su sabijani u uslovima bez podmazivanja kontaktnih površina dok je podmazivanje mašinskim uljem izvršeno pri sabijanju uzoraka S2 i S4. Posmatranjem slike 3.20 moguće je uočiti da tribološki uslovi u znatnoj meri utiču na vrednosti pokazatelja naponskog stanja. Takođe, smanjenjem trenja na kontaktnim površinama, moguće je ostvariti niže vrednosti β faktora. Dijagram na slici 3.20 takođe pokazuje da se primenom različitih triboloških uslova može uticati na to da u materijalu dođe do pojave pritisknog ili zateznog naponskog stanja. Više informacija o određivanju koeficijenta trenja je moguće pronaći u radovima [30, 55].

Tabela 3.2 Dimenzije uzoraka primenjenih u eksperimentu [47]

	Odnos $r_a=H_o/D_o$	Visina H_o [mm]	Prečnik D_o [mm]	Početa gстина ρ [%]	Opterećenje [MN]
	0.35	9.50	27.80	90	0.135
		9.75	27.75	80	0.08
		9.80	27.75	75	0.055
	0.56	16.20	27.80	90	0.135
		15.40	27.75	80	0.08
		15.00	27.75	75	0.055
	0.72	20.00	27.80	90	0.135
		20.30	27.75	80	0.08
		19.65	27.75	75	0.055



Slika 3.21 Promena pokazatelja naponskog stanja za različite grupe uzoraka [47]

Narayanasamy i saradnici su u [47] prikazali istoriju pokazatelja naponskog stanja pri sabijanju uzoraka različitih dimenzija, napravljenih od praha legure aluminijuma Al-Al₂O₃. Autori su u ovom radu varirali gustinu uzoraka, odnos visine i prečnika, kao i naponsko stanje, a kao rezultat predstavljena je zavisnost logaritamske deformacije i pokazatelja naponskog stanja. Dimenzije uzoraka korišćenih u eksperimentu su prikazani u tabeli 3.2, dok je promena pokazatelja naponskog stanja, u zavisnosti od deformacije, za slučaj jednoosnog naponskog stanja prikazana na slici 3.21.

Za proračun pokazatelja naponskog stanja, autori su preuzeli predloženu formulu u radu [71]:

$$\beta = \frac{3\sigma_m}{\sigma_{eff}} \quad (3.37)$$

gde je:

σ_m – srednji normalni napon

σ_{eff} – efektivni napon

S druge strane, proračun deformacija ε_z je izveden prema formuli:

$$\varepsilon_z = \ln \frac{H_f}{H_0} \quad (3.38)$$

gde je:

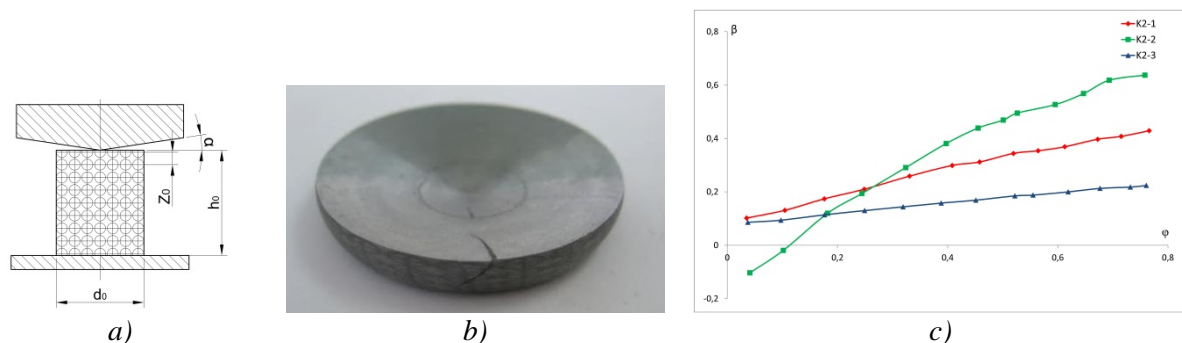
H_f – visina uzorka nakon deformacije

H_0 – početna visina uzorka

Na osnovu ispitivanja autori su zaključili da se s povećanjem gustine uzoraka i smanjenjem odnosa visine i prečnika povećava vrednost pokazatelja naponskog stanja. Takođe je moguće zaključiti da je na promenu pokazatelja naponskog stanja veći uticaj imao odnos visine i prečnika uzoraka nego gustina samih uzoraka.

Uticaj pokazatelja naponskog stanja na pojavu pukotine, odnosno na veličinu granične deformacije su istraživani u [9, 14, 58].

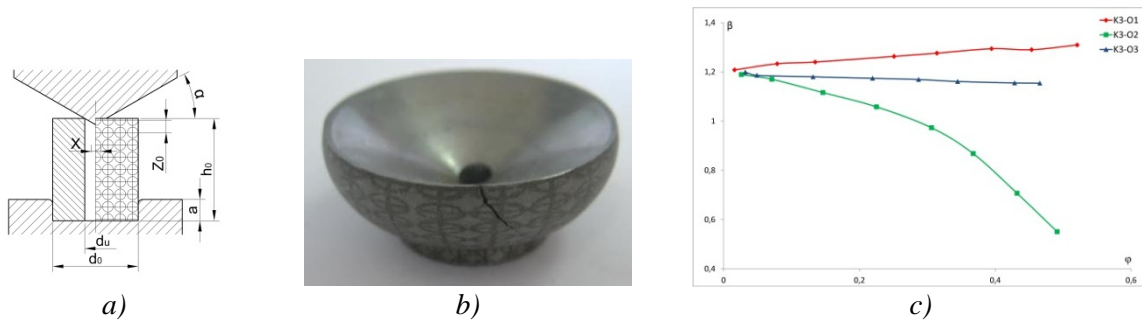
U magistarskoj tezi [45] je vršeno ispitivanje deformabilnosti čelika C45E pri sabijanju cilindričnih uzoraka alatima različitih oblika. Na slici 3.22 prikazan je slučaj sabijanja cilindra konusnim i ravnim alatom.



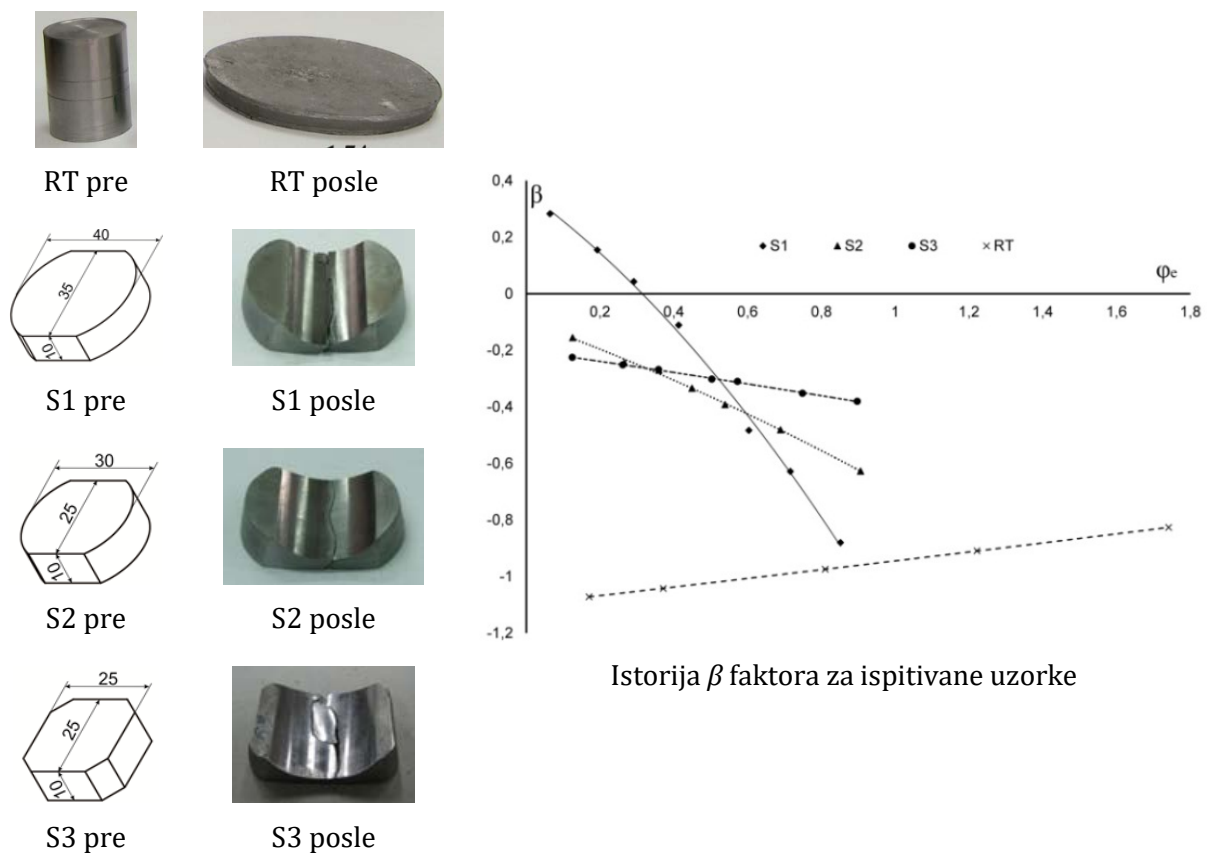
Slika 3.22 Sabijanje valjka ravnim i konusnim alatom, ugao konusa $\alpha=15^\circ$ [45]

Slika 3.22a predstavlja šemu procesa, dok je na slici 3.22b prikazan jedan uzorak nakon deformacije. Za ispitivanje su korišćena tri uzorka napravljena od istog materijala i sabijana u istim uslovima obrade. Kao što se može uočiti na slici 3.22c, došlo je do pojave različitih naponskih stanja iako su, uslovno rečeno, svi uticajni faktori bili isti. Odnosno, može se zaključiti da i mala promena jednog od uticajnih faktora (uslova trenja, lošijeg pozicioniranja uzorka u sistemu...) može uticati na to da proces deformisanja bude monoton ili ne.

Kod sabijanja cilindra s otvorom konusnim i udubljenim alatom moguće je ostvariti monoton proces deformisanja, što je prikazano na slici 3.23. Međutim, na osnovu slike 3.23c se može zaključiti da je za slučaj sabijanja 3 različita uzorka za dva ostvareno monotono deformisanje, dok je u slučaju jednog uzorka proces bio potpuno nemonoton. Razlog tome mogu biti nejednaki uslovi trenja ili greške u materijalu.



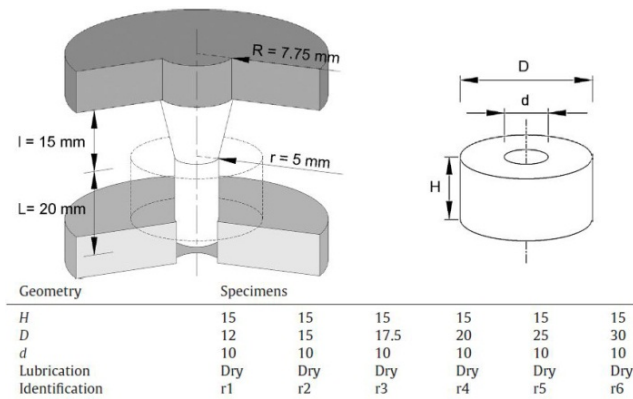
Slika 3.23 Sabijanje šupljeg valjka udubljenim i konusnim alatom, ugao konusa $\alpha=30^\circ$ [45]



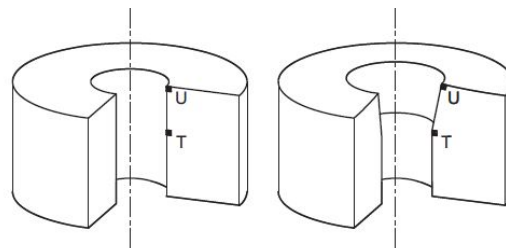
Slika 3.24 Sabijanje uzoraka cilindričnim i ravnim alatima [59]

Promena pokazatelja naponskog stanja za slučaj četiri vrste uzoraka je prikazana u radu [59]. Autori su ispitivali sabijanje cilindra ravnim alatima, kao i sabijanje uzoraka različitih dimenzija ravnim i cilindričnim alatom, slika 3.24. Na dijagramu koji predstavlja istoriju β faktora može se uočiti da ni u jednom od ispitivanih modela deformisanja serije S nije ispunjen uslov monotonosti procesa. Kod uzorka RT ostvareno je približno monotono deformisanje.

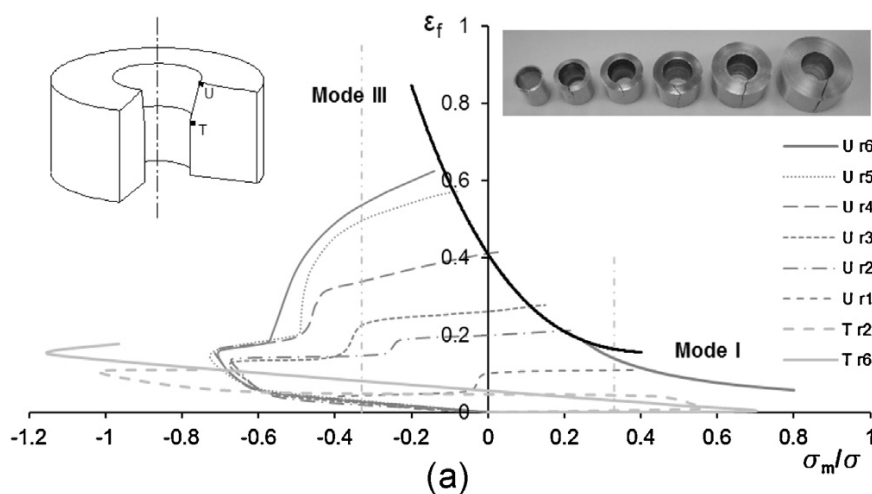
Uticao brzine defromacije na mogućnost ostvarenja konstantnog β faktora pri zatezanju i torziji su istraživali Gronostajski i Jaskiewicz u radu [21]. U radu je takođe ispitivan i uticaj temperature obrade na ostvarivost monotonosti procesa. Sva ispitivanja su se vršila na leguri bakra i silicijuma (CuSi3,5). Sabelnik i saradnici su u radu [53] ispitivali monotonost procesa zatezanja legure nikla na visokoj temperaturi.



Slika 3.25 Šema procesa i dimenzije uzoraka korišćenih u testu sabijanja prstena [53]



Slika 3.26 Zone merenja [54]



Slika 3.27 Promena pokazatelja naponskog stanja za primenjene uzorke [54]

U radu [54] je vršeno ispitivanje promene pokazatelja naponskog stanja za materijal AA2030-T4 pri sabijanju uzoraka prstenastog oblika. Šema procesa kao i dimenzije uzoraka su prikazane na slici 3.25. Ideja je bila da se na uzorku obeleže dve zone u kojima će se određivati granična deformacija i pokazatelj naponskog stanja. Položaji tih zona su prikazani na slici 3.26.

U zonama U i T su određene vrednosti deformacije i pokazatelja naponskog stanja i unete su u dijagram granične deformabilnosti koji je prethodno određen za ovaj materijal, slika 3.27. Na slici 3.27 su prikazane istorije pokazatelja naponskog stanja za posmatrane zone. Na osnovu slike se može zaključiti da se proces deformisanja u posmatranim zonama izvodi nemonotono.

3.6 UTICAJ ISTORIJE POKAZATELJA NAPONSKOG STANJA NA DEFORMABILNOST MATERIJALA

Plastična deformacija je proces koji se odvija između njenog početka na granici tečenja izraženog krivom tečenja i kraja izraženog granicom deformisanja. U tom procesu u zavisnosti od naponskog stanja u samom materijalu dolazi do većeg ili manjeg oštećenja polazne mikrostrukture. Oštećenja se pre svega odnose na umnožavanje dislokacija i stvaranje i umnožavanje mikrošupljina, kada zapravo dolazi do nepravilnog deformisanja, što dalje vodi ka oštećenju strukture materijala. Količina nastalih oštećenja mikrostrukture je proporcionalna ostvarenom stepenu deformacije, a intenzitet nastajanja zavisi od naponskog stanja. Samo izučavanje deformabilnosti materijala kao primarni cilj ima predviđanje, odnosno prognoziranje početka nastajanja nepravilnog plastičnog deformisanja. To prognoziranje se može uspešno ostvariti jedino pomoću dijagrama granične deformabilnosti.

Ukoliko se za definisanje dijagrama granične deformabilnosti primene monotoni procesi deformisanja, nije potrebno u obzir uzimati istoriju izvođenja procesa deformisanja na veličinu granične deformacije jer je pokazatelj naponskog stanja konstantan. Međutim, u procesima kod kojih je naponsko stanje promenljivo, uticaj β faktora se mora uzeti u obzir.

Pod istorijom pokazatelja naponskog stanja se podrazumeva zavisnost naponskog stanja od efektivne deformacije od:

$$\beta = f(\varphi_e) \quad (3.39)$$

Ovaj izraz predstavlja funkcionalnu zavisnost naponskog stanja od realizovane efektivne deformacije, od početka plastičnog tečenja, pa sve do kraja plastičnog deformisanja. Veličina granične deformacije zavisi od karaktera funkcionalne zavisnosti efektivne deformacije i naponskog stanja, koja može uvećati ili smanjiti vrednost granične deformacije. Zavisnost naponskog stanja od efektivne deformacije kao takva je neophodna da bi se mogla odrediti i srednja vrednost pokazatelja naponskog stanja u toku procesa. Opšti izraz za definisanje srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja ima oblik :

$$\beta_{sr} = \frac{1}{\varphi_e^g} \int_0^{\varphi_e^g} \beta(\varphi_e) d\varphi_e \quad (3.40)$$

Ovakav način određivanja srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja je prikazana u brojnim radovima [59, 64, 69, 5].

Analizom prethodnih jednačina kao i istraživanja koja su sprovedena u ovoj oblasti može se zaključiti da uticaj istorije β faktora može biti dvojak. Ukoliko se naponsko stanje u toku procesa deformisanja menja u smeru povećanja pritisnih napona, deformabilnost materijala se povećava. U suprotnom, prelazak iz negativne oblasti pokazatelja naponskog stanja u pozitivnu dovodi do smanjenja deformabilnosti.

Zavisnost pokazatelja naponskog stanja od efektivne deformacije je moguće odrediti jedino eksperimentalno, izvođenjem procesa deformisanja po fazama, pri čemu se za svaku fazu određuju vrednosti efektivne deformacije i pokazatelja naponskog stanja. Svaki par ovih vrednosti definiše jednu tačku funkcije (3.40). Ukoliko se proces podeli na veći broj faza, dobija se veći broj tačaka ove funkcije. Na osnovu tih vrednosti moguće je utvrditi krivu koja s dovoljnom tačnošću aproksimira dobijene podatke nakon čega je moguće odrediti i srednju vrednost pokazatelja naponskog stanja.

Uzimajući u obzir gore navedene činjenice, može se zaključiti da istorija pokazatelja naponskog stanja, odnosno promena naponskog stanja direktno utiču na ponašanje materijala u smislu mogućnosti ispoljavanja potencijala deformabilnosti. Iz tog razloga, pri kreiranju modela deformisanja koji će se primenjivati za konstruisanje dijagrama granične deformabilnosti treba težiti ka izboru onih modela kod kojih se komponente napona menjaju proporcionalno jednom opštem parametru. Kod procesa s nejednakim promenama komponenti napona uticaj β faktora na graničnu deformaciju može biti kako pozitivan (povećanjem pritisnih napona povećava se granična deformacija) tako i negativan (prelazak iz oblasti negativnog β faktora ka pozitivnom smanjuje graničnu deformaciju).

3.7 CILJ ISTRAŽIVANJA

Radi uspešnog projektovanja procesa hladnog zapreminskog deformisanja neophodno je poznavati informacije koje se odnose na geometriju dela koji se izrađuje, kvalitet obrađenih površina, tolerancije dimenzija itd. Međutim, za uspešno projektovanje tehnologije hladnog deformisanja s aspekta ponašanja materijala u obradnom sistemu, neophodno je poznavanje problematike koja se odnosi na određivanje maksimalne moguće deformacije, tj. granične deformacije pri kojoj dolazi do pojave loma ili drugog oblika oštećenja materijala. Odgovor na ova pitanja daje analiza deformabilnosti materijala.

Kako bi se obradni sistem mogao pravilno konstruisati s aspekta deformabilnosti materijala, neophodno je poznavati ponašanje materijala u različitim uslovima obrade.

„Problematika definisanja dijagrama granične deformabilnosti je veoma složena i predstavlja jedan od najtežih zadataka primenjene teorije plastičnosti. Osnovni problem koji se pri tome javlja jeste identifikacija naponskog i deformacionog stanja u zoni deformisanja u kojoj dolazi do pojave loma. Pojedine tačke dijagrama granične deformabilnosti u principu se mogu definisati primenom različitih modela deformisanja, ali pod uslovom da je u zoni razaranja moguće pouzdano odrediti komponente napona i deformacije. Male promene komponenti napona mogu izazvati značajnu promenu vrednosti pokazatelja naponskog stanja i na taj način onemogućiti pravilno definisanje dijagrama deformabilnosti. Isto važi i za komponente deformacija čija granična vrednost definiše ordinatu na dijagramu obradivosti. Definisanjem vrednosti

pokazatelja naponskog stanja i granične deformacije za određeni model deformacije definiše se i njegov položaj u dijagramu granične deformabilnosti“ [60].

„Utvrdivanje položaja određenog modela deformisanja u dijagramu granične deformabilnosti jednostavnije je i preciznije u slučaju monotoničnih modela deformisanja, kada je pokazatelj naponskog stanja približno konstantan tokom procesa obrade. Kada taj uslov nije ispunjen mora se uzeti u obzir istorija deformisanja i pokazatelj naponskog stanja utvrditi prema posebnoj metodologiji“ [60].

Cilj istraživanja sprovedenih u ovoj doktorskoj disertaciji je pronalaženje monotoničnih procesa deformisanja pri hladnoj zapreminskoj obradi i njihova primena za određivanje dijagrama granične deformabilnosti.

Pored značajnog uticaja oblika alata, na naponsko stanje u zoni deformisanja takođe utiče i geometrija priprema. Cilj je da se kombinacijom geometrije alata i priprema, kao i triboloških uslova varira naponsko stanje tokom obrade i na taj način dobije što više podataka za definisanje krive granične deformabilnosti.

Na veličinu granične deformacije bitno utiče, pored svojstava materijala, i naponsko stanje. Drugim rečima, za iznos maksimalnog mogućeg stepena deformacije nekog materijala bitno je poznavati naponsko stanje koje se javlja u toku obrade. Čak i kruti materijali mogu uspešno plastično da se deformišu ako se izlože dovoljno velikom svestranom pritisku.

Intenzivniji razvoj kao i primena tehnologije plastičnog defromisanja ne bi bili mogući bez adekvatnih i kontinualnih istraživanja. Ponašanje materijala u različitim uslovima obrade i definisanje uslova pod kojima će se čak i teško deformabilni materijali moći obraditi bez pojave oštećenja u strukturi materijala predstavlja jedan od najvažnijih segmenata tih istraživanja. Ova istraživanja takođe imaju veliki značaj s obzirom na to da se poboljšanjem uslova obrade u znatnoj meri može uticati i na smanjenje broja operacija, što direktno dovodi do smanjenja troškova proizvodnje.

Istraživanja prikazana u ovoj disertaciji se odnose na pronalaženje monotoničnih procesa deformisanja koji se mogu koristiti za određivanje dijagrama granične deformabilnosti. U tu svrhu sprovedena su opsežna eksperimentalna i numerička istraživanja. Dobijeni rezultati se mogu koristiti u praksi pri projektovanju tehnologije hladnog oblikovanja: kovanja, istiskivanja, valjanja navoja i zupčanika, valjanja prstenastih delova itd.

Pored definisanja dijagrama granične deformabilnosti primenom novih monotoničnih procesa deformisanja, jedan od ciljeva bio je i provera mogućnosti analize deformabilnosti materijala primenom komercijalnog softvera za simulacije procesa deformisanja. U tu svrhu je korišćen SimufactForming v.13 programski paket.

4. HIPOTEZA, KONCEPCIJA I METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

4.1 HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA

Hipoteza na osnovu koje se zasniva istraživanje prikazano u ovoj disertaciji glasi:

Oblik, geometrija uzoraka i alata i tribološki uslovi direktno utiču na mogućnost ostvarivanja monotonih procesa deformisanja pri hladnom zapreminskom oblikovanju.

4.2 KONCEPCIJA ISTRAŽIVANJA

Da bi se postavljeni ciljevi i hipoteza ostvarili, definisana je odgovarajuća koncepcija kao i metodologija istraživanja.

Koncepcija istraživanja monotonih procesa deformisanja zasnovana je na pronalaženju adekvatne geometrije uzoraka, geometrije alata kao i triboloških uslova kako bi se definisali modeli kod kojih se u toku procesa deformisanja pokazatelj naponskog stanja ne menja. Kod monotonih modela deformisanja određivanje naponskog stanja je relativno jednostavno, što je od velike važnosti za određivanje dijagrama granične deformabilnosti. Primenom monotonih modela deformisanja biće određen dijagram granične deformabilnosti.

Pri izboru novih modela deformisanja bilo je potrebno voditi računa:

- da se definišu takvi modeli kod kojih će pokazatelj naponskog stanja u toku čitavog procesa deformisanja ostati nepromenjen,
- da definisani modeli deformisanja imaju s praktičnog aspekta određeni značaj u tehnologiji plastičnog deformisanja,
- da se dobijeni rezultati mogu koristiti pri projektovanju drugih tehnoloških postupaka hladnog plastičnog deformisanja,
- da konstrukciono rešenje alata bude što jednostavnije.

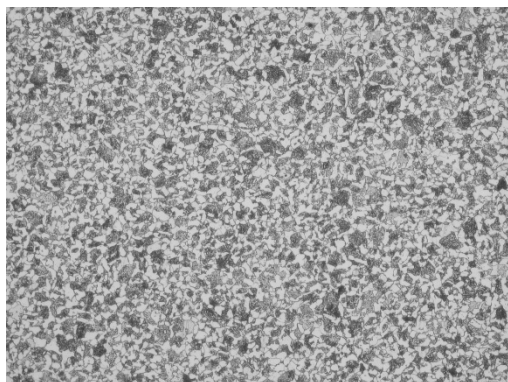
Celokupna istraživanja prikazana u disertaciji su sprovedena na konstrukcionom čeliku za poboljšanje, oznake C45E (Č1531). Hemijski sastav upotrebljenog čelika je određen u saradnji s Laboratorijom za ispitivanje materijala, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu i Metalurško-

hemijskom laboratorijom Cimos Kikinda. Na uzorku je izvršena spektrohemijska analiza prema standardu SRPS C. A1.011 iz 2004. godine i rezultati su prikazani u tabeli 4.1.

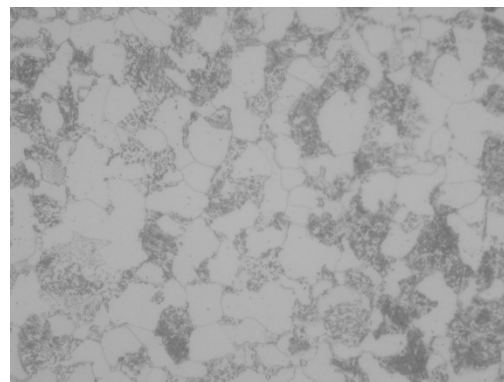
Tabela 4.1 Hemijski sastav za materijal C45E

C45E (Č1531)	Hemijski sastav								
	%C	%Si	%Mn	%S	%Cr	%P	Al	Cu	Ni
Merna nesigurnost	±0,01	±0,001	0,033	±0,001	0,004	±0,001	±0,002	±0,020	±0,004

Pre same izrade uzoraka materijal je meko žaren na temperaturi od 680°C u trajanju od 6 časova kako bi se dobila sitnozrna mikrostruktura povoljna za proces deformisanja, slika 4.1. Ovakav režim termičke obrade je usvojen zbog mikrostrukturnog stanja isporučenog materijala a u saradnji s Laboratorijom za termičku obradu i Laboratorijom za ispitivanje materijala, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu.



a) Uvećanje 100x



b) Uvećanje 500x

Slika 4.1 Mikrostruktura čelika C45E nakon mekog žarenja

4.3 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

U tezi, sabijanje uzoraka vršeno je inkrementalno, pri čemu je svaki uzorak sabijan za određeni stepen deformacije više od prethodnog. Inicijalno je jedan uzorak sabijen do pojave pukotine, na osnovu čega je određen stepen deformacije koji treba ostvariti za ostale uzorke.

Istraživanja u ovoj tezi izvršena su primenom:

- teorijsko-eksperimentalne metode,
- metode numeričke simulacije.

U prvom slučaju određivanje pokazatelja naponskog stanja vršeno je primenom deformacione teorije (kojom je uspostavljena zavisnost napona i deformacija) uz eksperimentalno određivanje komponenti deformacije u zoni razaranja.

Izrazi za uspostavljanje veze između napona i deformacija, kao i određivanje pokazatelja naponskog stanja su prikazani u nastavku.

$$\sigma_{\theta} = \sigma_z \left(\frac{1+2 \cdot \alpha}{2+\alpha} \right) \quad (4.1)$$

$$\sigma_z = \frac{\pm \sigma_e}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{1+2 \cdot \alpha}{2+\alpha} \right) + \left(\frac{1+2 \cdot \alpha}{2+\alpha} \right)^2 \right]}} \quad (4.2)$$

Kako se u tezi ispituju modeli slobodnim sabijanjem, na slobodnoj površini radijalna komponenta napona je $\sigma_r=0$. Veličine koje se koriste za određivanje naponskih komponenti su deformacije u aksijalnom i tangencijalnom pravcu, zavisno od modela deformisanja.

U izrazima 4.1 i 4.2 figuriše faktor α koji predstavlja odnos deformacija za odgovarajuću fazu deformisanja:

$$\alpha = \frac{d\varphi_{\theta}}{d\varphi_z} \quad (4.3)$$

Da bi se faktor α mogao odrediti, potrebno je uspostaviti vezu između deformacija u dva pravca θ i Z u obliku $\varphi_{\theta}=f(\varphi_z)$. Vrednosti parova logaritamskih deformacija φ_z i φ_{θ} se određuju za svaku fazu deformisanja koji se aproksimiraju polinomom drugog reda:

$$\varphi_{\theta} = A\varphi_z^2 - B\varphi_z \quad (4.4)$$

Vrednosti logaritamskih deformacija se određuju na osnovu izraza:

$$\varphi_{\theta} = \ln \left(\frac{D}{D_0} \right) \quad (4.5)$$

$$\varphi_z = \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \quad (4.6)$$

Gde su: D – prečnik uzorka za određenu fazu deformisanja,

D_0 – početni prečnik uzorka,

Z – dimenzija pojasa za određenu fazu sabijanja,

Z_0 – početna dimenzija pojasa.

Vrednost treće komponente deformacije φ_r se računa na osnovu jednakosti zapremine:

$$\varphi_z + \varphi_{\theta} + \varphi_r = 0 \quad (4.7)$$

S obzirom na to da se na slobodnoj površini na kojoj dolazi do pojave pukotine javlja ravansko naponsko stanje, pokazatelj naponskog stanja β se određuje prema sledećem izrazu:

$$\beta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_e} = \frac{\sigma_{\theta} + \sigma_z}{\sigma_e} \quad (4.8)$$

Efektivni napon se računa na osnovu sledećeg izraza:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{\theta}^2 + \sigma_z^2 - \sigma_{\theta} \cdot \sigma_z} \quad (4.9)$$

Kako bi bilo moguće odrediti istoriju deformisanja, neophodno je poznavati i efektivnu deformaciju:

$$\varphi_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_\theta - \varphi_r)^2 + (\varphi_r - \varphi_z)^2 + (\varphi_z - \varphi_\theta)^2} \quad (4.10)$$

Poznavanjem pokazatelja naponskog stanja i efektivne deformacije za svaku fazu deformisanja, moguće je odrediti istoriju pokazatelja naponskog stanja i predstaviti je u zavisnosti $\beta=f(\varphi_e)$.

Za određivanje srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja (vrednosti relevantne za određivanje dijagrama granične deformabilnosti) primenjuje se sledeći izraz:

$$\beta_{sr} = \frac{1}{\varphi_e^s} \int_0^{\varphi_e^s} \beta(\varphi_e) d\varphi_e \quad (4.11)$$

Metoda numeričke simulacije za potrebe određivanja pokazatelja naponskog stanja i granične deformacije korišćena je u dve varijante. U prvoj varijanti određivane su komponente deformacije u zoni razaranja, na osnovu kojih je primenom deformacione teorije određen β faktor. U drugoj varijanti su direktno određivane komponente napona na osnovu kojih je definisan pokazatelj naponskog stanja β .

4.4 IZBOR GEOMETRIJE UZORAKA

Izbor geometrije uzoraka izvršen je na osnovu istraživanja sadržaja literature prikazanih u poglavljima 2 i 3 kao i numeričke analize procesa.

Polazna osnova za izbor geometrije uzoraka bila je ispunjenost uslova monotonosti procesa deformisanja. Pored toga, bilo je bitno da se pukotina u toku procesa javlja na spoljnoj slobodnoj površini uzorka, kako bi vizuelna detekcija bila moguća. Kako je cilj ovog rada pronalaženje monotonih modela deformisanja i njihova primena za odrađivanje dijagrama granične deformabilnosti, težilo se ka pronalaženju modela deformisanja koji su raspoređeni u oblasti pokazatelja naponskog stanja od -2 do +2.

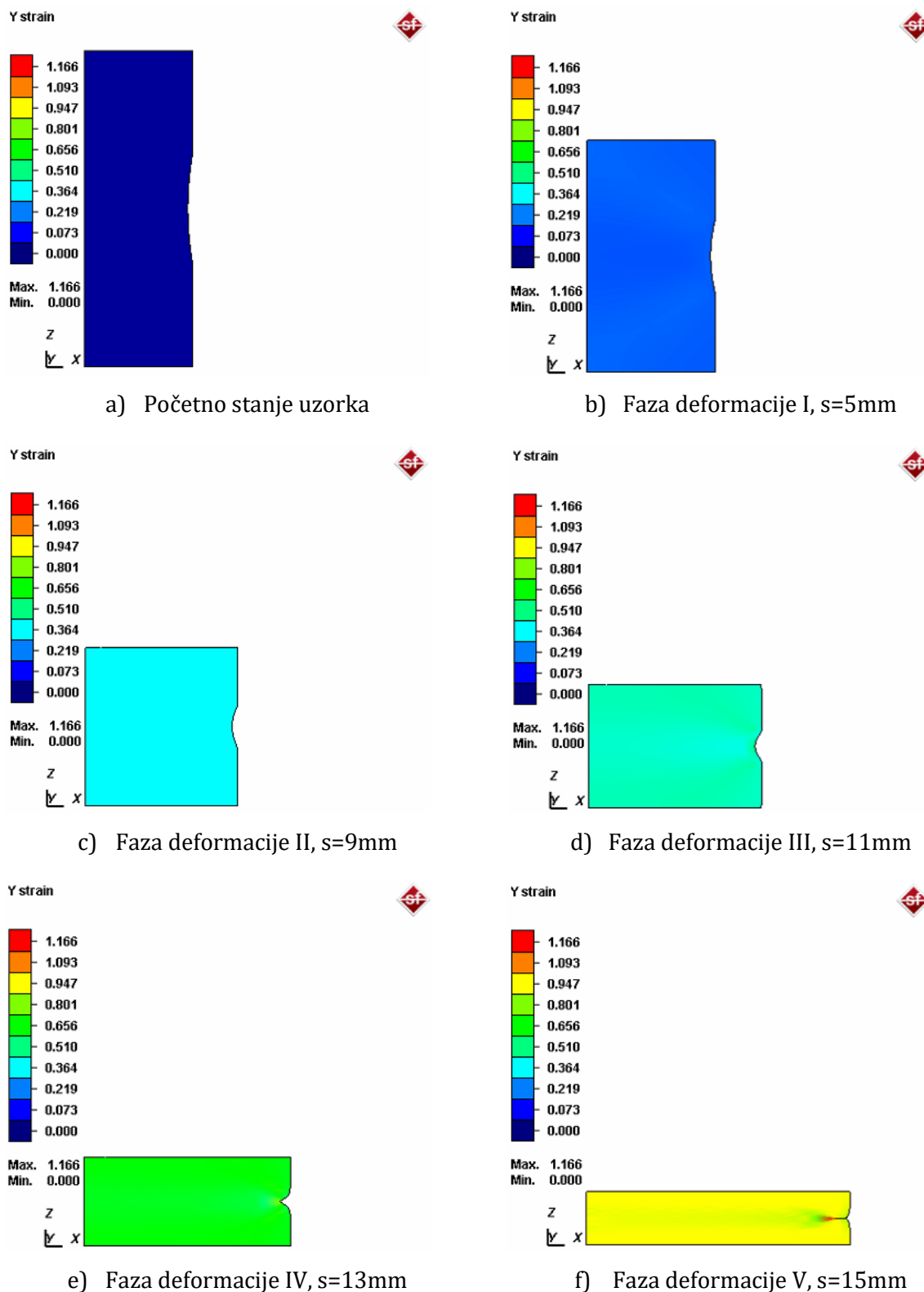
Kako bi se ispunio ovaj cilj, a smanjili troškovi istraživanja, za definisanje geometrije uzoraka korišćene su numeričke simulacije kroz koje je varirana geometrija uzoraka i alata. Samo modeli koji su zadovoljili uslov monotonosti su izabrani i eksperimentalno verifikovani. Sve vreme je ostvarena monotonost procesa.

Kao polazna osnova za izbor odgovarajućih modela, korišćeni su postojeći modeli deformisanja koji ne ispunjavaju uslov monotonosti. Na njima su vršene izmene geometrije kako bi se kreirao adekvatan model. Ako se kao primer uzme Rastegajev uzorak, može se zaključiti da se kombinacijom odnosa visine i prečnika može uticati na sam proces deformisanja. Takođe, izmenom dela spoljne površine direktno se utiče na istoriju deformisanja.

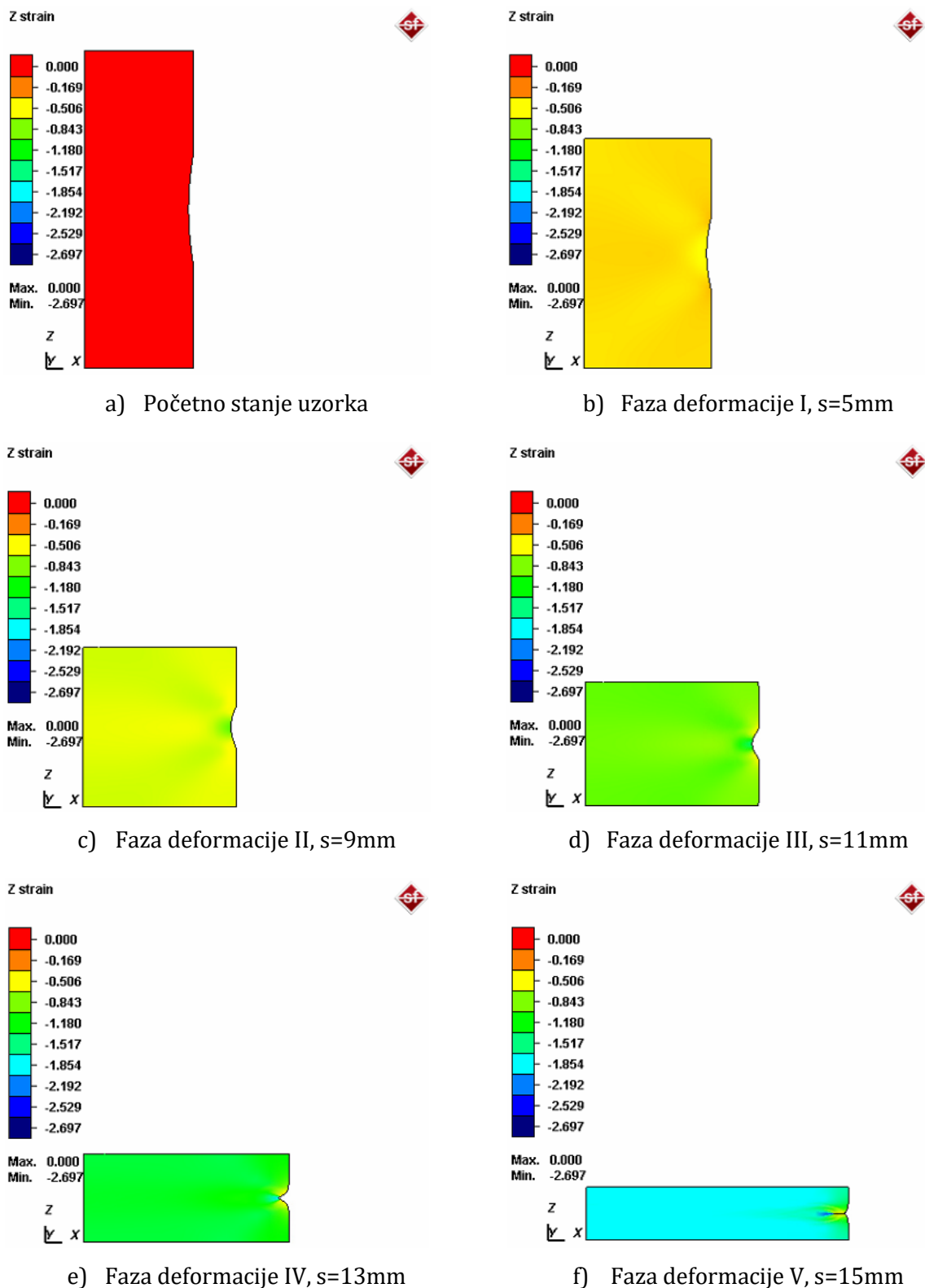
U nastavku je dat prikaz uticaja radijusa spoljne površine na istoriju deformisanja (za ovu analizu korišćena je deformaciona teorija). Deformacije su praćene u jednoj tački uzorka, na meridijalnoj ravni.

Polazna osnova za definisanje geometrije uzorka R_L (detaljnije informacije o ovoj i ostalim grupama uzoraka su prikazane u tabeli 4.3) jeste geometrija standardnog uzorka Rastegajev koji

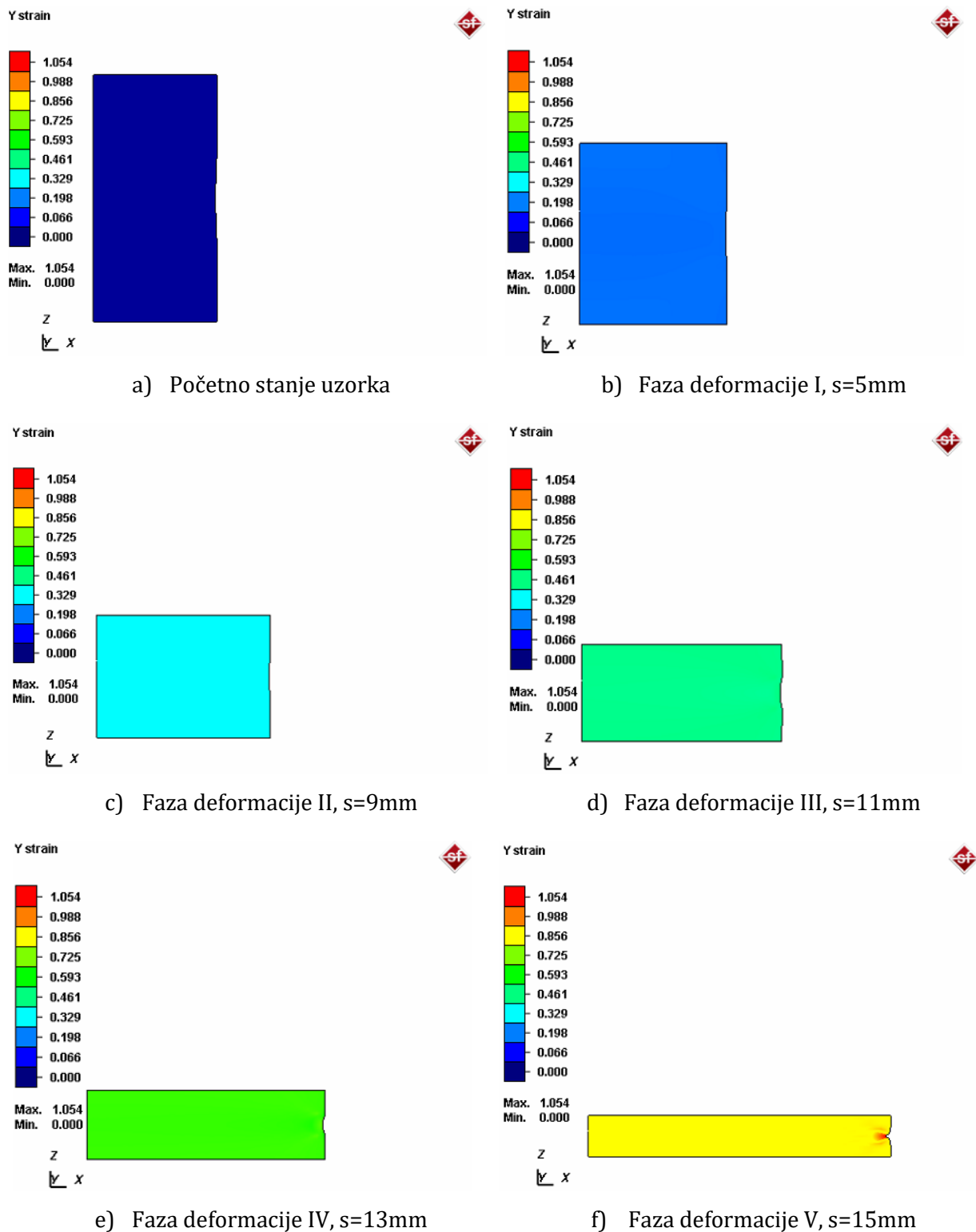
je korišćen za određivanje krive tečenja. Za ovaj model je poznato da se primenom stearina u velikoj meri neutrališe trenje na kontaktnoj površini alata i uzorka.



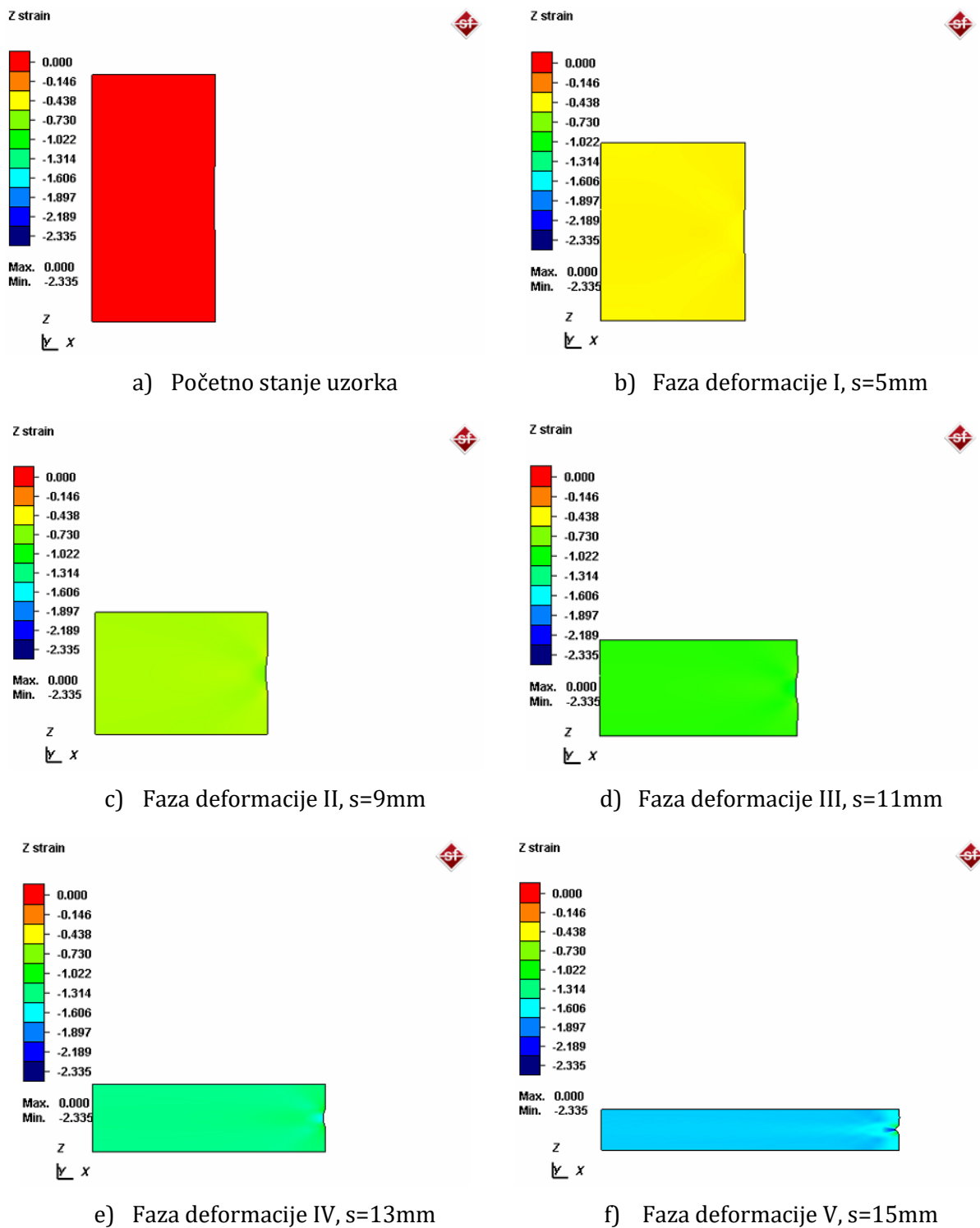
Slika 4.2 Deformaciono stanje za model R_L u tangencijalnom pravcu – radijus 40mm



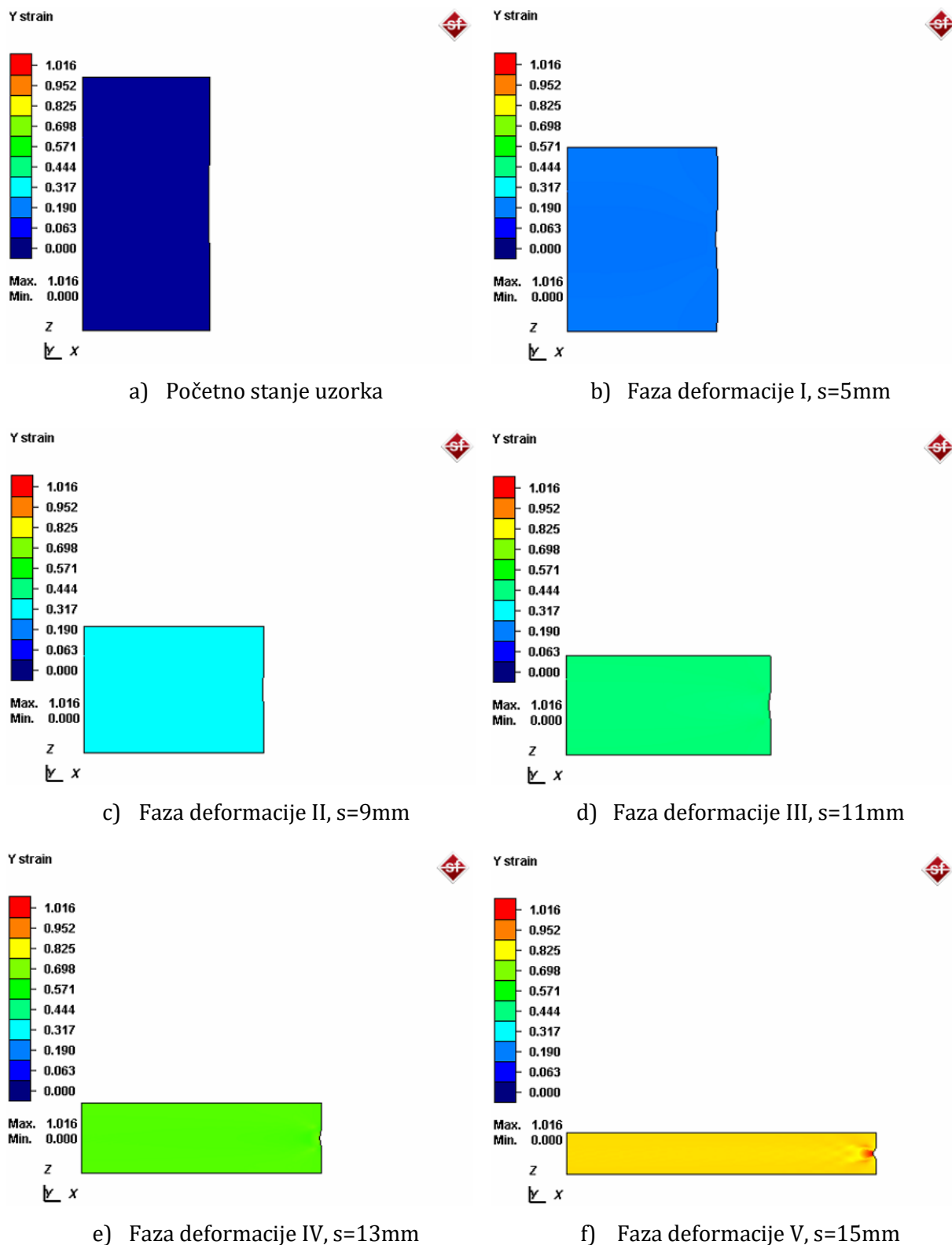
Slika 4.3 Deformaciono stanje za model R_L u pravcu kretanja alata – radius 40mm



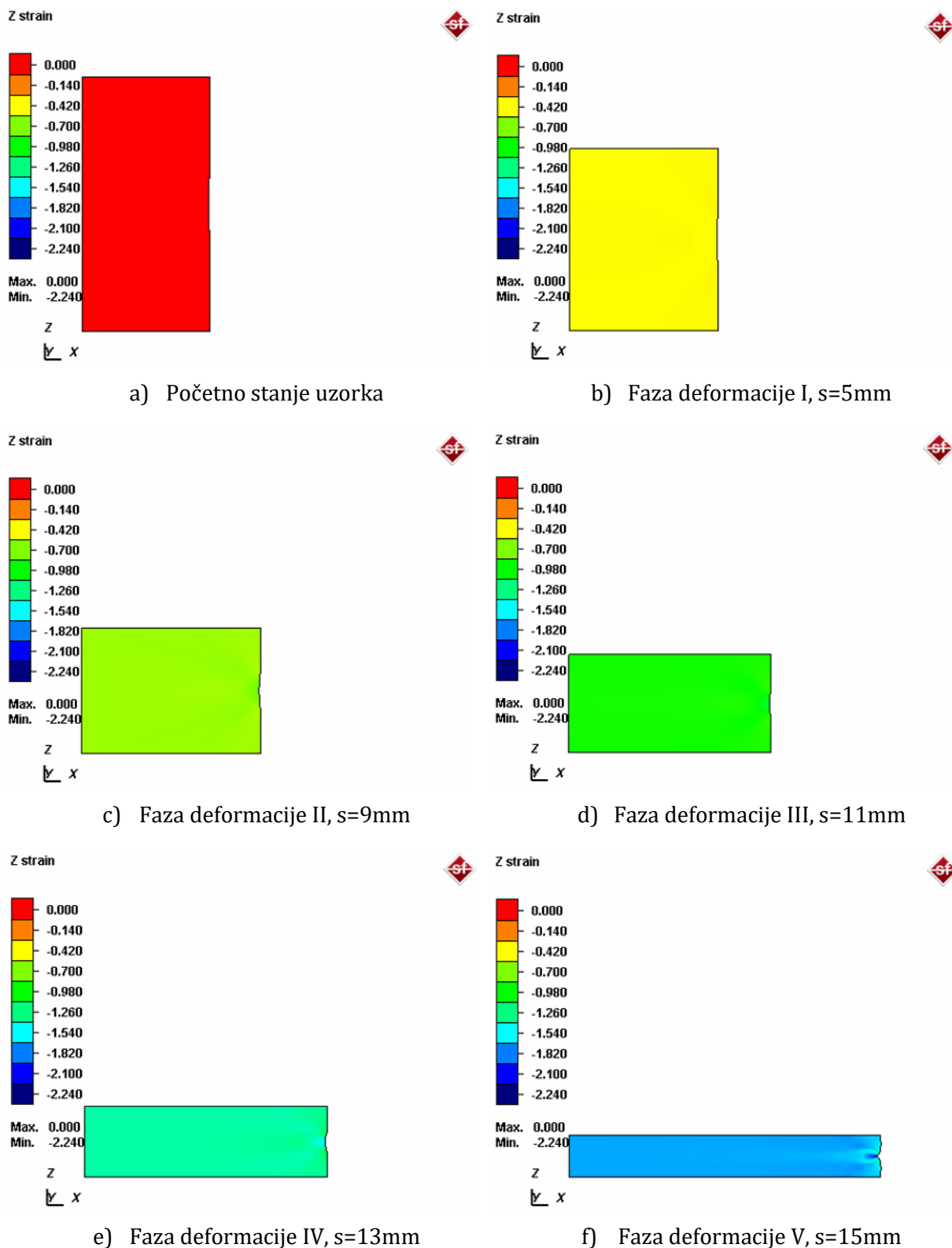
Slika 4.4 Deformaciono stanje za model R_L u tangencijalnom pravcu – radijus 50mm



Slika 4.5 Deformaciono stanje za model R_L u pravcu kretanja alata – radijus 50mm



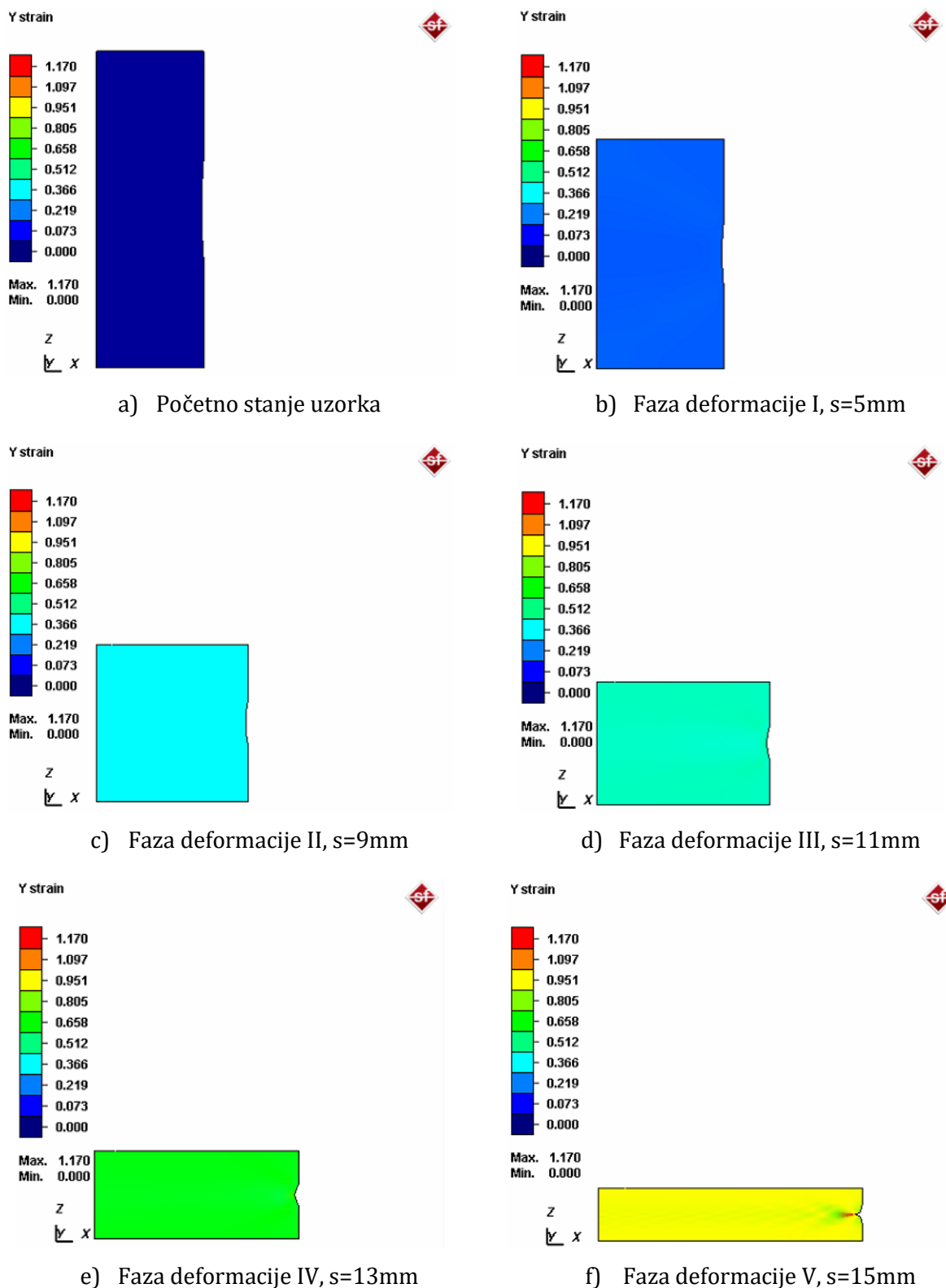
Slika 4.6 Deformaciono stanje za model R_L u tangencijalnom pravcu- radijus 60mm



Slika 4.7 Deformaciono stanje za model R_L u pravcu kretanja alata – radius 60mm

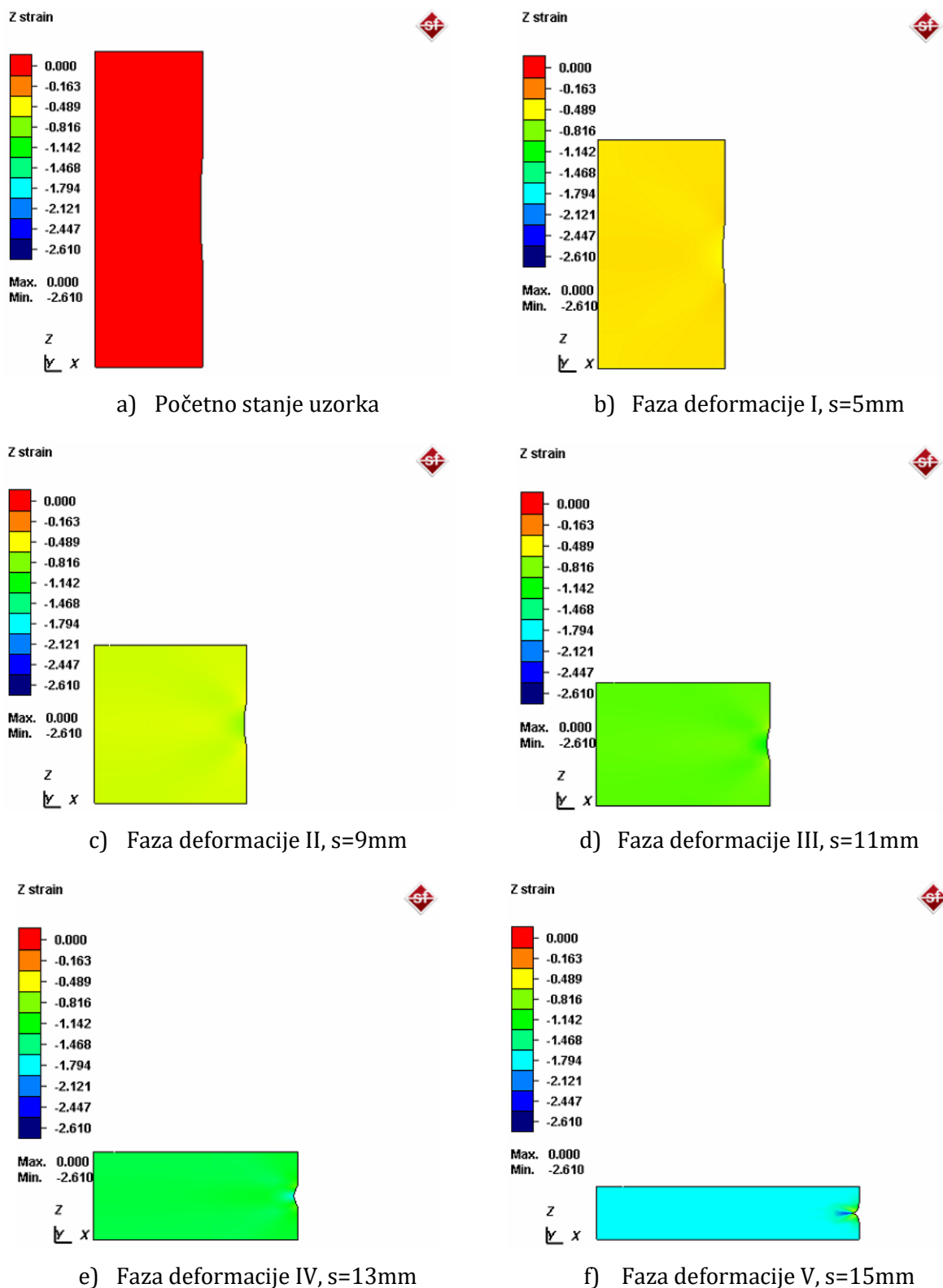
Međutim, takva geometrija uzorka nije u potpunosti odgovarala cilju istraživanja, pa je primenom numeričke analize utvrđeno da se kod Rastegajev uzorka s lukom na spoljašnjoj površini (tabela 4.3, broj 2) može ostvariti monoton proces deformisanja, ali i proširiti dijagram granične deformabilnosti u oblasti pritisknog naponskog stanja. Na slikama od 4.2 do 4.9 je dat

prikaz promene deformacija prema simulaciji za 4 različita radijusa (40mm, 50mm, 60mm, 80mm).



Slika 4.8 Deformaciono stanje za model R_L u tangencijalnom pravcu – radijus 80mm

U tabeli 4.2 dat je prikaz vrednosti deformacija φ_z i φ_θ za sva 4 prikazana modela, a uticaj radijusa na monotonost procesa kroz odnos dveju deformacija je prikazan na slici 4.10.



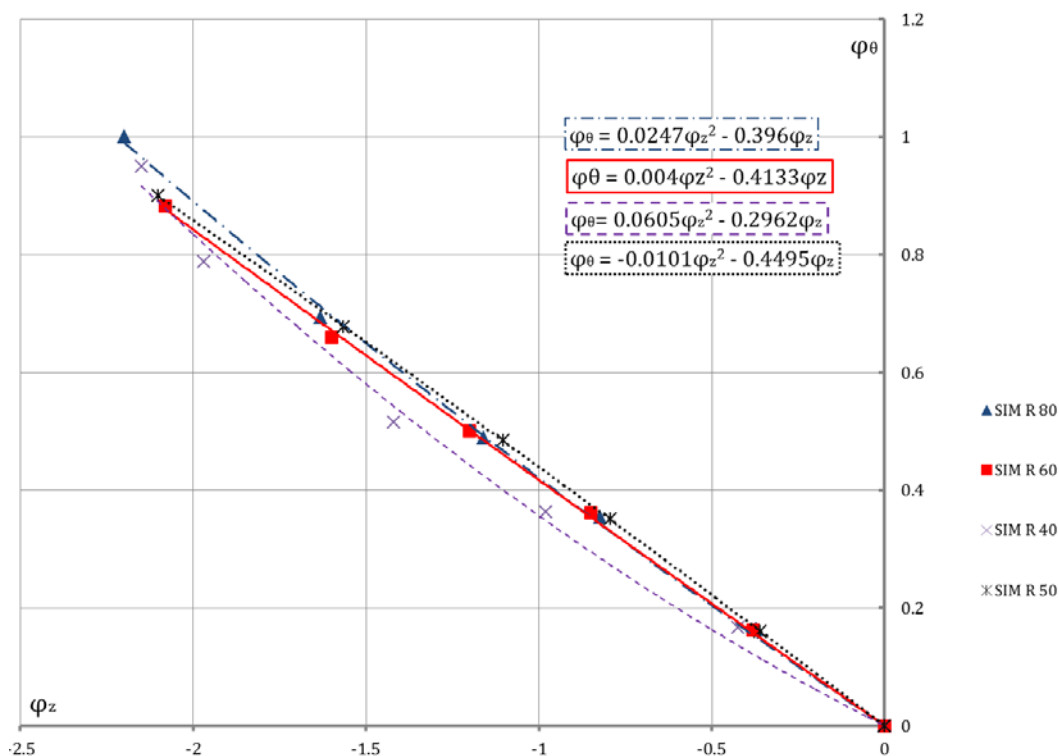
Slika 4.9 Deformaciono stanje za model R_L u pravcu kretanja alata – radius 80mm

Na slici 4.10 je prikazana istorija deformisanja za 4 različita radijusa. Moguće je zaključiti da je u slučaju radijusa 40, 50 i 80mm proces deformisanja nemonoton, dok je u slučaju radijusa 60mm proces potpuno monoton.

Još jedan bitan faktor u određivanju radijusa je bila i mogućnost merenja deformacija tokom eksperimenta. Ako se posmatra simulacija sabijanja uzorka s radijusom 80mm i 40mm, primećuje se da bi u poslednjoj fazi eksperimentalnog ispitivanja bilo nemoguće izmeriti deformacije zbog tečenja materijala u predelu radijusa ka unutrašnjosti (preklapanje materijala).

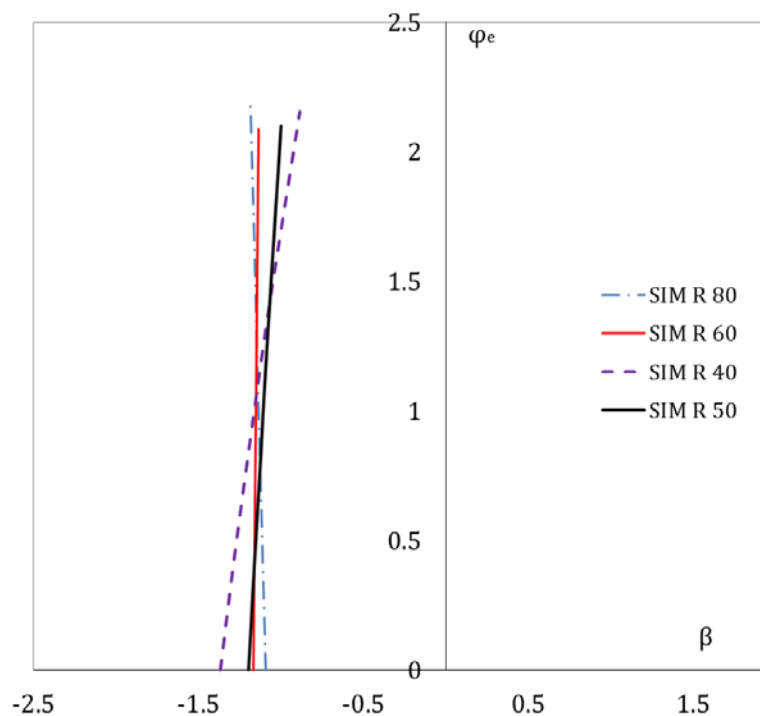
Tabela 4.2 Vrednosti deformacija za prikazane modele

Uzorak	R40		R50		R60		R80	
Faza	φ_z	φ_θ	φ_z	φ_θ	φ_z	φ_θ	φ_z	φ_θ
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	-0,424	0,167	-0,359	0,160	-0,380	0,163	-0,371	0,164
2	-0,979	0,363	-0,793	0,351	-0,850	0,361	-0,823	0,353
3	-1,420	0,515	-1,103	0,484	-1,200	0,500	-1,159	0,89
4	-1,970	0,788	-1,565	0,677	-1,600	0,660	-1,631	0,693
5	-2,15	0,950	-2,100	0,900	-2,08	0,883	-2,200	1,000



Slika 4.10 Put deformacije za 4 različita radijusa

Isti princip definisanja geometrije uzoraka je primenjen i na ostale tipove uzoraka.

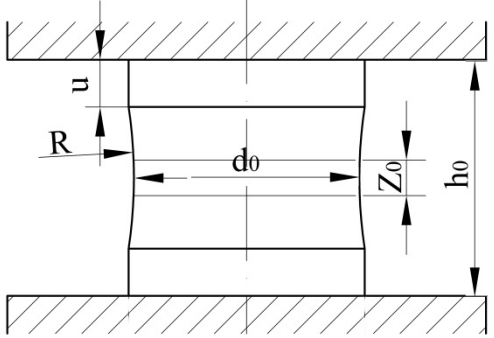
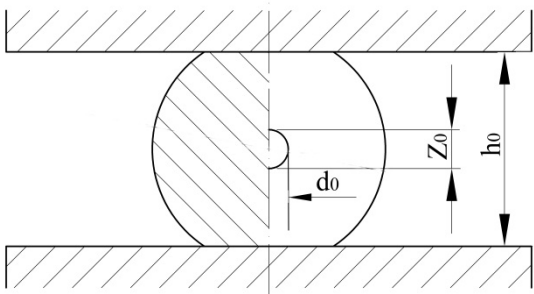
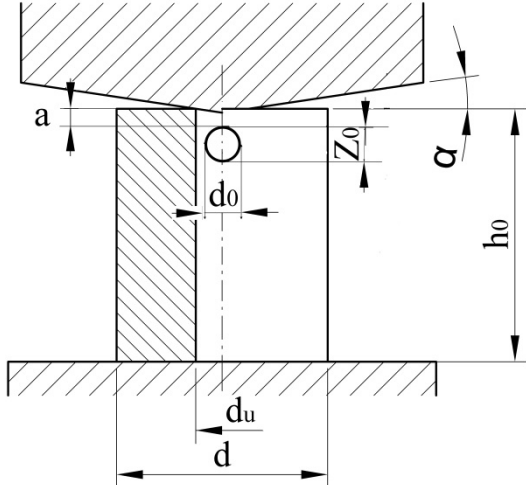
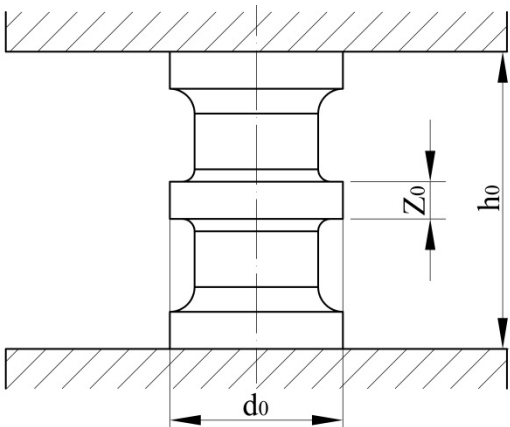


Slika 4.11 Istorija deformisanja za 4 različita radijusa

Tabela 4.3 Modeli deformisanja

Br.	Oznaka modela	Skica modela	Dimenzije modela
1.	R		$d_0=20 \text{ mm}$ $h_0=20 \text{ mm}$ $u=0,6 \text{ mm}$ $t=0,3 \text{ mm}$
2.	R_L		$d_0=18 \text{ mm}$ $h_0=18 \text{ mm}$ $R=60 \text{ mm}$ $Z_0=3 \text{ mm}$ $u=0,6 \text{ mm}$ $t=0,3 \text{ mm}$ $b=6 \text{ mm}$

Tabela 4.3 Modeli deformisanja - nastavak

3.	C_L		<p> $d_0=20$ mm $h_0=20$ mm $Z_0=3$mm $R=40$ mm $u=3,5$ mm </p>
4.	C_Z		<p> $d_0=18$ mm $h_0=15$ mm $Z_0=3$mm </p>
5.	CO_KRA		<p> $d_0=20$ mm $h_0=22$ mm $d_u=5$ mm $Z_0=5$mm $\alpha=8,5^\circ$ $a=2,5$mm </p>
6.	C_3D		<p> $d_0=14$ mm $h_0=24$ mm $Z_0=3$mm </p>

Metodologija istraživanja je zasnovana na definisanju novih modela deformisanja kod kojih će se pokazatelj naponskog stanja zadržati konstantnim tokom celog procesa deformisanja. Istraživanja u okviru doktorske disertacije su izvedena prema sledećim fazama:

- Određivanje krive tečenja za materijal C45E u meko žarenom stanju,
- Eksperimentalno i numeričko utvrđivanje naponskog stanja u uzorcima preko pokazatelja naponskog stanja β ,
- Eksperimentalna provera ispunjenosti uslova monotonosti procesa deformisanja,
- Primena novih monotonih modela deformisanja za određivanje dijagrama granične deformabilnosti.

Naponske komponente su identifikovane i analizirane samo na mestu pojave vidljive pukotine na uzorcima.

Modeli deformisanja na kojima su vršena eksperimentalna i numerička istraživanja su prikazani u tabeli 4.3.

Model deformisanja R predstavlja model deformisanja koji se koristi za Rastegajev test (tabela 4.3, uzorak 1). Model R ima specijalno definisanu geometriju sa žljebovima (dubina u) na kontaktnim površinama, a pre procesa deformisanja se u žljeb postavlja stearinska kiselina kako bi se u toku procesa deformisanja smanjilo trenje na kontaktnim površinama. Ovaj model je korišćen samo za određivanje krive tečenja.

Model R_L predstavlja modifikovani Rastegajev uzorak s radijusom na spoljašnjoj površini (tabela 4.3, uzorak 2). Kao i kod prethodnog modela, u žljeb dubine u se postavlja stearinska kiselina kako bi se smanjilo kontaktno trenje.

Kod modela C_L geometrija uzorka je projektovana u cilju ostvarivanja monotonog deformisanja pri sabijanju ravnim alatima (tabela 4.3, uzorak 3). Podmazivanje je izvršeno mineralnim uljem.

Model deformisanja C_Z predstavlja model sabijanja zasečenog cilindra ravnim alatima (tabela 4.3, uzorak 4). Podmazivanje je izvršeno mineralnim uljem.

Kod modela CO_KRA sabijanje cilindra s otvorom je izvršeno ravnim i konusnim alatom (tabela 4.3, uzorak 5). Podmazivanje je izvršeno mineralnim uljem. Ideja za ovaj tip modela deformisanja je preuzeta iz magistarskog rada [45]. U magistarskom radu Movrin je vršio sabijanje cilindričnog uzorka $\Phi 20 \times 24$ mm ravnim i konusnim alatima.

Poslednji ispitivani model C_3D je sabijan ravnim alatima (tabela 4.3, uzorak 6), pri podmazivanju mineralnim uljem.

Za proveru monotonosti modela deformisanja prikazanih u tabeli 4.3 primenjena je metodologija prikazana u poglavlju 4.3. Primenom ove metodologije moguće je utvrditi istoriju pokazatelja naponskog stanja koja direktno pokazuje da li je proces deformisanja monoton ili ne. Ista metodologija će se koristiti za određivanje položaja prikazanih modela na dijagramu granične deformabilnosti.

Sabijanje svake grupe prikazanih modela deformisanja je vršeno u pet serija, po pet uzoraka, od kojih je svaki uzorak predstavljao jedan inkrement deformacije. Za svaki uzorak računato su dve komponente logaritamske deformacije φ_z i φ_θ .

Zavisnost $\beta(\varphi_e)$ određuje se eksperimentalno, tako što se na kraju svake faze mere rastojanja između prethodno definisanih tačaka (vrednosti prečnika i visine ekvatorijalnog pojasa z) i određuju vrednosti parova tačaka β_i i φ_{ei} .

Kada se za svaki inkrement procesa deformisanja odrede parovi tačaka β i φ_e konstruiše se dijagram istorije pokazatelja naponskog stanja u obliku $\beta=f(\varphi_e)$. Posmatranjem ove zavisnosti moguće je utvrditi da li je proces deformisanja monoton ili ne.

Kao što je i ranije opisano, za određivanje granične deformabilnosti ne može biti merodavna vrednost pokazatelja β na kraju procesa, već se u obzir mora uzeti tok procesa, tj. istorija deformisanja. Zbog toga je uveden pojam srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja β_{sr} koji se određuje prema sledećem izrazu [60]:

$$\beta_{sr} = \frac{1}{\varphi_{eg}} \int_0^{\varphi_{eg}} \beta(\varphi_e) d\varphi_e \quad (4.12)$$

gde je:

φ_{eg} – granična efektivna deformacija u trenutku razaranja,

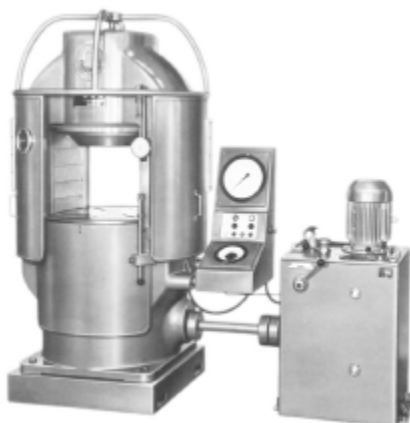
φ_e – efektivna deformacija koja se menja s vremenom,

$\beta(\varphi_e)$ – istorija pokazatelja naponskog stanja.

Kada se primenom zavisnosti $\beta=f(\varphi_e)$ utvrdi da je proces deformisanja monoton, na osnovu vrednosti parova tačaka β_i , φ_{ei} , odnosno analitičke aproksimacije krive koja predstavlja njihovu zavisnost određuje se β_{sr} . Određivanjem parova φ_{eg} i β_{sr} za svaku seriju uzoraka konstruiše se dijagram granične deformabilnosti.

4.5 MAŠINA, ALATI I OPREMA KORIŠĆENI ZA EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

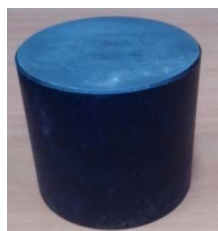
Eksperimentalni deo istraživanja izveden je u Laboratoriji za tehnologije plastičnog deformisanja na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Za potrebe sabijanja izabranih uzoraka korišćena je hidraulična presa trostrukog dejstva Sack & Kiesselbach nominalne sile 6,3MN, slika 4.12 čije su glavne konstruktivne karakteristike pokretni radni sto u kome je smešten izbacivač i robusno kućište visoke krutosti.



Slika 4.12 Hidraulična presa Sack & Kiesselbach

Pored navedenih karakteristika, presa omogućuje fino podešavanje brzine radnog stola i veličine hoda, kao i automatsko zaustavljanje pri dostizanju određene sile. Od dodatne opreme, presa poseduje analogni pokazivač sile.

Za sabijanje uzoraka korišćeni su, zavisno od grupe uzoraka, ravni i konusni alati, slika 4.13. Alati su izrađeni od čelika Č4150, kaljeni na tvrdoću $58\pm 1\text{HRC}$ i fino brušeni.



a) Ravni alat



b) Konusni alat

Slika 4.13 Alati korišćeni u eksperimentalnim istraživanjima

Za potrebe merenja hoda i sile u toku procesa korišćena je sledeća merna oprema:

- Osmokanalno merno pojačalo Spider 8, proizvođača Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM), Nemačka,
- Davač pritiska P3M 500bar, HBM,
- Davač hoda W20 $\pm 50\text{mm}$, HBM,
- Personalni računar,
- Programski paket Catman Easy,
- Optički skener visoke rezolucije, HP 4370.



Slika 4.14 Prikaz merenja deformacije po z osi

Određivanje deformacija je vršeno merenjem prečnika uzorka digitalnim pomičnim merilom i merenjem visine ekvatorijalnog pojasa pomoću optičkog skenera i programa AutoCAD. Merenja promene prečnika i visine ekvatorijalnog pojasa su vršena na tri mesta na uzorku, koja su pod uglom od 120° jedan u odnosu na drugi po omotaču uzorka i prilikom proračuna korišćena je srednja vrednost. Na slici 4.14 dat je prikaz merenja deformacije u z pravcu.

Merenja su izvršena tako što se na lenjiru (koji je uzet s pomičnog kljunastog merila), postavljenom pored uzorka i skeniranim zajedno s njim, izmeri skala na 10mm. Na osnovu njene izmerene vrednosti i proporcije skalira se slika, kako bi se dobila njena prava veličina, a zatim vrši merenje visine pojasa i dobijaju se realne vrednosti potrebnih rastojanja.

5. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

5.1 ODREĐIVANJE KRIVE TEČENJA MATERIJALA C45E

Sa stanovišta naponskog stanja, napon tečenja je karakteristika materijala kojom se određuje kada materijal, usled dejstva opterećenja, prelazi iz elastičnog u plastično stanje. Kod elastično-plastičnih materijala napon tečenja ima različite vrednosti za različite veličine deformacije. Radi toga se napon tečenja određuje u funkciji od veličine ekvivalentne deformacije. Veza napona tečenja s ekvivalentnom deformacijom definiše krivu tečenja. Bez informacija o naponu tečenja materijala nisu moguća precizna projektovanja procesa tehnologije deformisanja, niti bilo kakve analize u ovoj oblasti. Stoga napon tečenja izražen kao funkcija ekvivalentne deformacije predstavlja osnovnu ulaznu informaciju o materijalu za tehnologiju plastičnog deformisanja [73]. Takođe, u numeričkoj analizi procesa plastičnog deformisanja kao jedan od osnovnih parametara materijala potrebna je kriva tečenja materijala. Za određivanje krive tečenja može se koristiti više metoda:

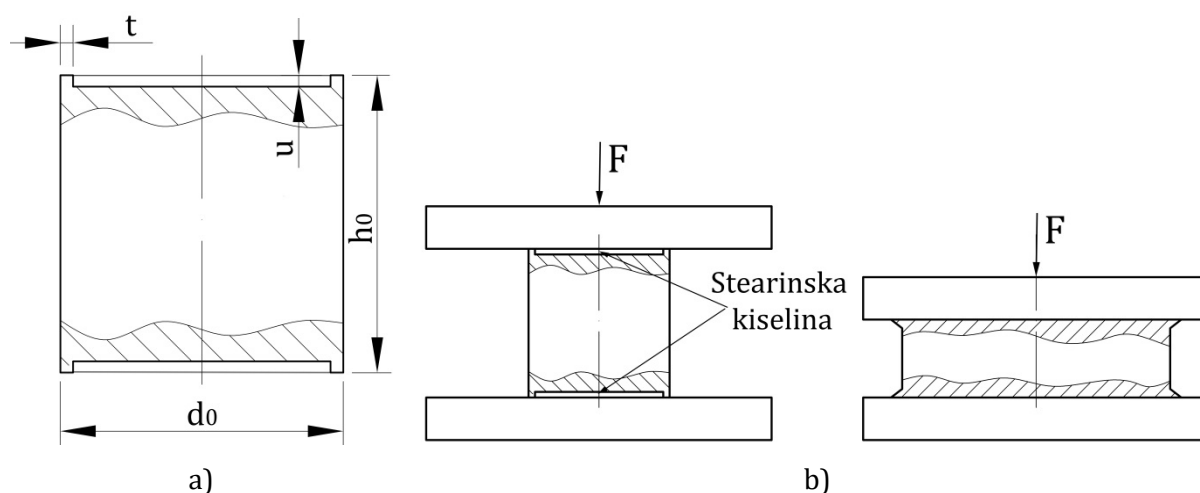
- ispitivanje na zatezanje,
- slobodno sabijanje valjka,
- slobodno sabijanje paralelopipeda,
- istosmerno istiskivanje,
- ispitivanje na uvijanje,
- valjanje i dr.

Merenjem deformacione sile i određenih parametara tokom izvođenja navedenih procesa, može se s većom ili manjom tačnošću utvrditi vrednost specifičnog deformacionog otpora.

Kod ispitivanja na zatezanje moguće je odrediti koeficijent deformacionog ojačavanja u okviru malih deformacija, jer su vrednosti ravnomernog izduženja referentnog dela epruvete u intervalu od 15-30%. Krive tečenja dobijene na ovaj način nisu dovoljno precizne i ne mogu se koristiti za uspešno projektovanje većine procesa obrade deformisanjem, jer su veličine deformacije kod procesa zapreminskog deformisanja znatno iznad vrednosti postignutih ovom metodom. Kod

sabijanja valjka prednost je činjenica da je moguće ostvariti znatno veće vrednosti deformacija. U pojedinim slučajevima procenat deformacije može ići i preko 100%. Nedostatak pri primeni ovog modela za određivanje krive tečenja je kontaktno trenje koje otežava proces generisanja zapreminskog naponskog stanja. Izborom odgovarajuće geometrije cilindra, kao i sredstva za podmazivanje, može se smanjiti veličina kontaktnog trenja, što troosno naponsko stanje svodi na jednoosno.

Jedan od najpoznatijih postupaka za određivanje krive tečenja u području velikih deformacija, koji se danas smatra standardnom metodom je postupak Rastegajev [50]. Na slici 5.1 je dat izgled uzorka kao i šema procesa.



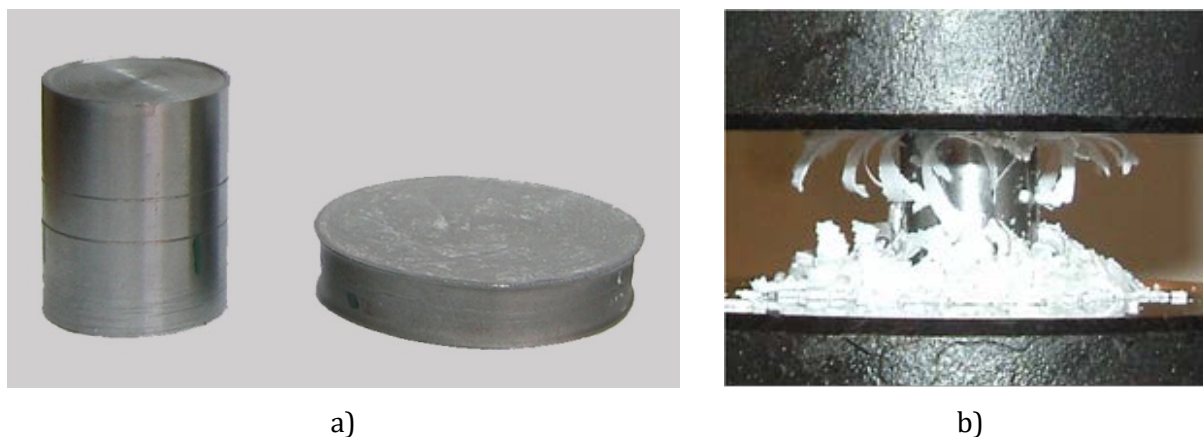
Slika 5.1 Metoda Rastegajev: a) geometrija uzorka za Rastegajev test [50] i b) šematski prikaz procesa

Prilikom određivanja krive tečenja primenom Rastegajev metode u čeonu udubljenja se unosi stearinska kiselina koja uspešno razdvaja kontaktne površine alata i uzorka tokom deformisanja. Na ovaj način se uticaj trenja minimalizuje i omogućuje se ravnomerno deformisanje, odnosno oblik uzorka ostaje cilindričan tokom čitavog procesa [50]. Početne dimenzije uzorka za test Rastegajev nisu precizno definisane, što omogućuje veliki broj kombinacija odnosa visine i prečnika, ali su istraživanja pokazala da je optimalan odnos d_0 i h_0 između 1 i 1,5 [73].

Primenom ovog metoda određivanja krive tečenja moguće je ostvariti visoke vrednosti deformacije ali se prema [73] preporučuje da se proces sabijanja izvodi do vrednosti deformacije $\varphi=1$. Kada deformacija u toku procesa pređe tu vrednost, postoji mogućnost pojave neravnomerne deformacije.

U ovoj doktorskoj disertaciji kriva tečenja za materijal C45E je određena primenom gore pomenute metode. U tu svrhu je primenjeno 5 uzoraka, početnih dimenzija prikazanih u tabeli 4.3, uzorci s oznakom modela R . Parovi tačaka specifičnog deformacionog otpora K [MPa] i efektivne deformacije φ su dobijeni direktnim merenjem tokom kontinualnog procesa sabijanja, a uz korišćenje merne opreme navedene u poglavlju 4. Detaljan prikaz jednačina za određivanje vrednosti za K i φ je dat u [45].

Na slici 5.2 je prikazan izgled uzorka pre i posle deformisanja kao i izgled uzorka u toku procesa, gde je vidljiva stearinska kiselina.

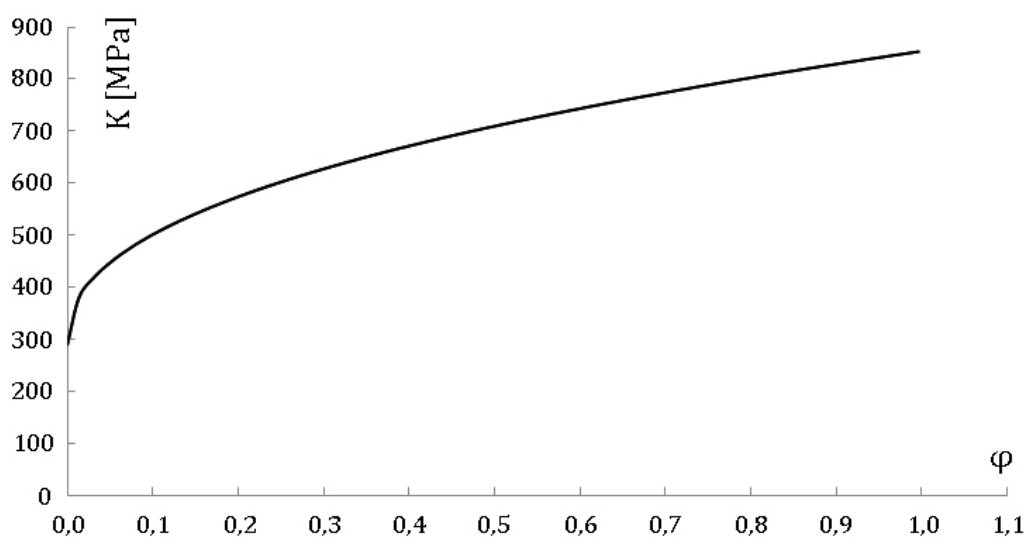


Slika 5.2 Izgled uzorka pre i posle deformacije (a) i izgled uzorka u toku procesa (b)

Primenom softvera Microsoft Excel parovi tačaka deformacionog otpora i efektivne deformacije se mogu povezati, a statističkom obradom rezultata pomoću statističkog modula programa Mathematica moguće je dobiti krivu tečenja u obliku $K=K(\varphi)$.

U doktorskoj disertaciji kriva tečenja je aproksimirana u obliku Ludwik-ove zavisnosti i prikazana je jednačinom 5.1 dok je grafička interpretacija krive tečenja data na slici 5.3.

$$K = 293,15 + 573,15 \cdot \varphi^{0,413} \quad (5.1)$$



Slika 5.3 Kriva tečenja za materijal C45E

5.2 EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE MONOTONIH PROCESA DEFORMISANJA

Eksperimentalna istraživanja su sprovedena s ciljem pronalaženja monotoni procesa deformisanja, odnosno ispitivanja uticaja geometrije uzoraka i alata kao i triboloških uslova na mogućnost ostvarivanja monotoni procesa deformisanja.

5.2.1 SABIJANJE UZORAKA GRUPE R_L RAVNIM ALATIMA

Uzorci grupe R_L su sabijani ravnim alatima pri podmazivanju stearinom. Dimenzije uzoraka korišćenih u eksperimentu, kao i šema procesa su dati u tabeli 4.3. Za potrebe eksperimentalnih istraživanja izrađeno je 25 uzoraka koji su sabijani u pet serija po 5 uzorka. Svi uzorci su imali istu geometriju.



a) Početno stanje uzorka



b) Faza deformisanja I, $s=5\text{mm}$



c) Faza deformisanja II, $s=9\text{mm}$



d) Faza deformisanja III, $s=11\text{mm}$



e) Faza deformisanja IV, $s=13\text{mm}$



f) Faza deformisanja V, $s=15\text{mm}$

Slika 5.4 Izgled uzoraka grupe R_L po fazama

Izgled uzorka od nulte do poslednje faze sabijanja je dat na slici 5.4 dok je izgled pukotine na spoljnoj površini uzorka prikazan na slici 5.4f.

Pored provere monotonosti procesa cilj ovog eksperimenta je bio i ostvarivanje visoke vrednosti granične deformacije pri negativnoj vrednosti pokazatelja naponskog stanja $\beta < -1$.

Na osnovu početnih vrednosti visine i prečnika ekvatorialnog pojasa, primenom jednačina 4.5 i 4.6 izračunate su vrednosti logaritamskih deformacija za sve serije ispitivanih uzoraka i prikazane su u tabelama od 5.1 do 5.5.

Tabela 5.1 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 1 grupe R_L

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ Z ₀₃ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ Z ₃ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ d ₀₃ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ d ₃ [mm]	d _{sr} [mm]	φ_z	φ_θ
0	3,06 3,01 3,00	3,02	3,06 3,01 3,00	3,02	17,79 17,78 17,76	17,78	17,79 17,78 17,76	17,78	0,000	0,000
1	3,06 3,01 3,00	3,02	2,23 2,17 2,18	2,19	17,79 17,78 17,76	17,78	20,30 20,20 20,26	20,26	-0,321	0,131
2	3,06 3,01 3,04	3,04	1,46 1,43 1,45	1,45	17,78 17,79 17,75	17,77	24,10 24,12 24,14	24,12	-0,740	0,340
3	3,05 3,03 3,02	3,03	1,02 1,12 1,07	1,08	17,74 17,74 17,73	17,74	27,40 27,44 27,40	27,40	-1,032	0,435
4	3,03 3,02 3,01	3,02	0,64 0,60 0,66	0,63	17,75 17,75 17,76	17,75	33,25 33,30 33,32	33,28	-1,567	0,629
5	3,02 3,02 3,01	3,02	0,45 0,44 0,42	0,44	17,72 17,72 17,72	17,72	39,76 39,75 39,75	39,75	-1,926	0,808

Tabela 5.2 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 2 grupe R_L

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ Z ₀₃ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ Z ₃ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ d ₀₃ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ d ₃ [mm]	d _{sr} [mm]	φ_z	φ_θ
0	3,05 3,03 3,02	3,03	3,05 3,03 3,02	3,03	17,75 17,74 17,73	17,74	17,75 17,74 17,73	17,74	0,000	0,000
1	3,05 3,03 3,02	3,03	2,15 2,08 2,09	2,11	17,75 17,74 17,73	17,74	20,65 20,64 20,64	20,64	-0,362	0,151
2	3,00 2,95 3,00	2,95	1,34 1,38 1,37	1,36	17,75 17,74 17,74	17,74	24,38 24,38 24,38	24,38	-0,784	0,318
3	3,01 3,01 2,99	3,01	1,03 1,02 1,07	1,04	17,77 17,77 17,77	17,77	27,91 27,93 27,91	27,92	-1,059	0,452
4	3,01 2,99 3,03	2,99	0,66 0,65 0,64	0,65	17,75 17,75 17,75	17,75	32,57 32,55 32,55	32,55	-1,533	0,606
5	3,02 2,98 3,01	2,98	0,41 0,38 0,35	0,38	17,75 17,75 17,75	17,75	40,00 39,97 39,98	39,98	-2,066	0,812

Tabela 5.3 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 3 grupe R_L

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ Z ₀₃ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ Z ₃ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ d ₀₃ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ d ₃ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _θ
0	3,06 3,00 3,04	3,03	3,06 3,00 3,04	3,03	17,78 17,78 17,78	17,78	17,78 17,78 17,78	17,78	0,000	0,000
1	3,06 3,00 3,04	3,03	2,12 2,12 2,16	2,13	17,78 17,78 17,78	17,78	20,81 20,83 20,81	20,81	-0,352	0,157
2	3,02 3,00 3,02	3,01	1,33 1,41 1,39	1,38	17,78 17,74 17,76	17,76	25,02 25,02 25,00	25,01	-0,780	0,342
3	3,01 3,00 3,01	3,01	1,03 0,99 1,03	1,02	17,75 17,74 17,73	17,74	27,75 27,76 27,75	27,75	-1,082	0,447
4	3,02 3,04 3,04	3,03	0,66 0,62 0,65	0,64	17,75 17,74 17,73	17,74	32,33 32,36 32,35	32,35	-1,555	0,601
5	3,01 3,01 3,01	3,01	0,34 0,35 0,37	0,35	17,78 17,77 17,78	17,78	41,81 41,78 41,80	41,80	-2,152	0,855

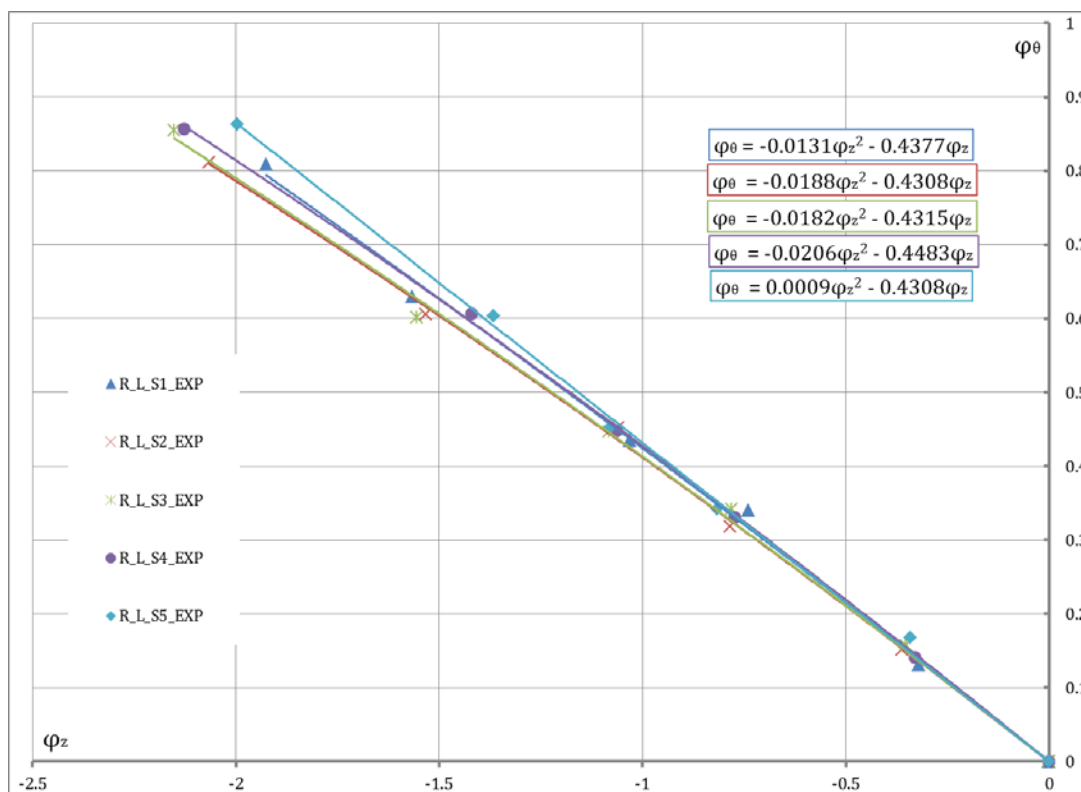
Tabela 5.4 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 4 grupe R_L

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ Z ₀₃ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ Z ₃ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ d ₀₃ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ d ₃ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _θ
0	3,01 3,03 3,05	3,03	3,01 3,03 3,05	3,03	17,81 17,81 17,81	17,81	17,81 17,81 17,81	17,81	0,000	0,000
1	3,01 3,03 3,05	3,03	2,13 2,21 2,19	2,18	17,81 17,81 17,81	17,81	20,52 20,52 20,49	20,51	-0,329	0,141
2	3,01 3,00 3,01	3,01	1,33 1,37 1,46	1,39	17,76 17,77 17,77	17,77	24,75 24,74 24,74	24,74	-0,773	0,331
3	3,04 3,02 3,05	3,04	1,00 1,02 1,13	1,05	17,76 17,77 17,76	17,76	27,77 27,80 27,80	27,79	-1,063	0,448
4	3,05 2,98 3,02	3,02	0,66 0,69 0,83	0,73	17,77 17,77 17,77	17,77	32,62 32,61 32,61	32,61	-1,420	0,607
5	3,01 3,02 3,04	3,02	0,32 0,39 0,38	0,36	17,79 17,79 17,79	17,79	41,92 41,95 41,88	41,92	-2,127	0,857

Tabela 5.5 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 5 grupe R_L

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ Z ₀₃ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ Z ₃ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ d ₀₃ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ d ₃ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _θ
0	3,02 3,01 3,01	3,01	3,01 3,01 3,01	3,01	17,80 17,83 17,77	17,80	17,80 17,83 17,77	17,80	0,000	0,000
1	3,02 3,01 3,01	3,01	2,11 2,12 2,11	2,11	17,83 17,83 17,82	17,83	20,89 20,85 20,92	20,89	-0,355	0,158
2	3,01 3,04 3,05	3,03	1,31 1,29 1,30	1,30	17,75 17,77 17,73	17,75	24,91 24,99 24,85	24,91	-0,846	0,339
3	3,02 3,04 3,02	3,03	0,98 0,98 0,98	0,98	17,80 17,80 17,80	17,8	27,96 27,90 28,00	27,69	-1,129	0,442
4	3,02 3,01 3,02	3,02	0,66 0,65 0,67	0,67	17,78 17,77 17,78	17,78	32,01 32,05 31,98	32,01	-1,506	0,588
5	3,03 3,01 3,02	3,02	0,40 0,40 0,40	0,40	17,80 17,81 17,80	17,8	42,20 42,30 42,11	42,20	-2,022	0,863

Na slici 5.5 je prikazan odnos logaritamskih deformacija u dva pravca φ_θ – φ_z kao i aproksimacija polinomom drugog reda za svaku seriju uzoraka grupe R_L. Na slici 5.5 moguće je primetiti da je put deformacije za svih pet serija ove grupe uzoraka približno isti. Shodno tome, moguće je izvesti zaključak da su za svaku grupu uzoraka ostvareni slični tribološki uslovi.



Slika 5.5 Put deformacije za grupu R_L

Na osnovu matematičke aproksimacije zavisnosti logaritamskih deformacija izračunate su vrednosti za faktor α koje predstavljaju prvi izvod polinoma koji opisuje zavisnost logaritamskih deformacija. Nakon toga, primenom jednačina od 4.1 do 4.10, određuje se vrednosti komponenti napona kako bi se uspostavila veza između efektivne deformacije φ_e i pokazatelja naponskog stanja β . Izračunate vrednosti za svaku fazu deformisanja za svih 5 serija su prikazane u tabelama od 5.6 do 5.10.

Tabela 5.6 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 1 grupe uzoraka R_L

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-0,438	-1,039	-0,082	-1,123	0,000
1	-0,429	-1,044	-0,094	-1,138	0,323
2	-0,418	-1,050	-0,109	-1,159	0,741
3	-0,411	-1,054	-0,118	-1,172	1,036
4	-0,397	-1,061	-0,136	-1,197	1,577
5	-0,387	-1,066	-0,149	-1,215	1,934

Tabela 5.7 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 2 grupe uzoraka R_L

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-0,431	-1,043	-0,092	-1,136	0,000
1	-0,417	-1,051	-0,110	-1,161	0,364
2	-0,401	-1,059	-0,131	-1,190	0,789
3	-0,391	-1,064	-0,144	-1,208	1,063
4	-0,373	-1,073	-0,168	-1,241	1,544
5	-0,353	-1,083	-0,193	-1,276	2,082

Tabela 5.8 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 3 grupe uzoraka R_L

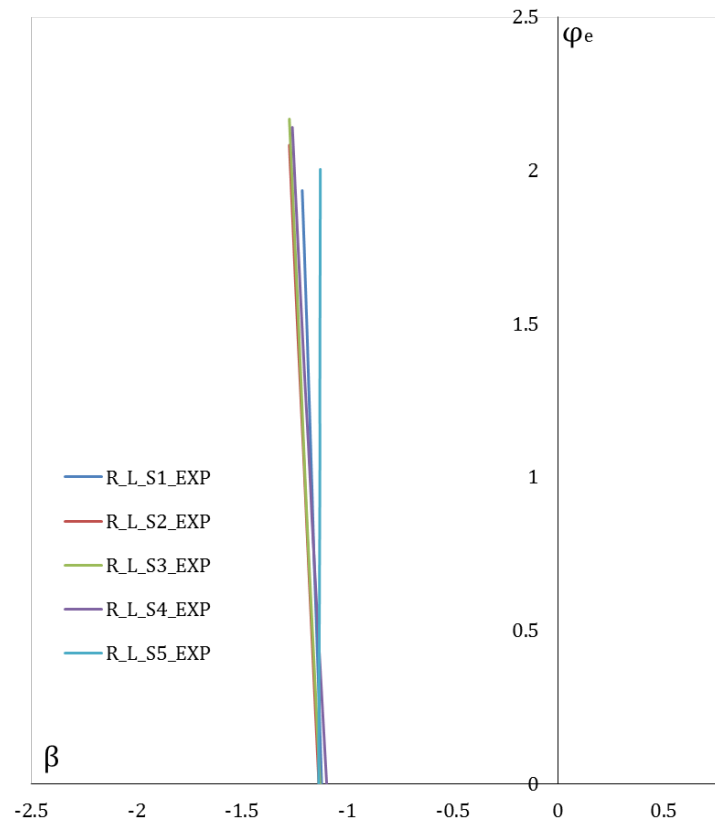
Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-0,432	-1,042	-0,090	-1,131	0,000
1	-0,419	-1,049	-0,107	-1,156	0,353
2	-0,403	-1,058	-0,129	-1,187	0,782
3	-0,392	-1,064	-0,143	-1,207	1,087
4	-0,375	-1,072	-0,165	-1,237	1,568
5	-0,353	-1,083	-0,193	-1,276	2,167

Tabela 5.9 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 4 grupe uzoraka R_L

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-0,448	-1,033	-0,069	-1,099	0,000
1	-0,435	-1,040	-0,086	-1,126	0,330
2	-0,416	-1,051	-0,111	-1,162	0,776
3	-0,405	-1,057	-0,126	-1,183	1,067
4	-0,390	-1,065	-0,146	-1,211	1,425
5	-0,361	-1,079	-0,183	-1,262	2,140

Tabela 5.10 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 5 grupe uzoraka R_L

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-0,431	-1,043	-0,092	-1,137	0,000
1	-0,431	-1,043	-0,092	-1,135	0,341
2	-0,432	-1,042	-0,090	-1,132	0,820
3	-0,433	-1,042	-0,089	-1,131	1,084
4	-0,433	-1,042	-0,089	-1,131	1,370
5	-0,434	-1,041	-0,088	-1,129	2,003



Slika 5.6 Promena pokazatelja naponskog stanja β u zavisnosti od efektivne deformacije φ_e za grupu uzoraka R_L

Promena pokazatelja naponskog stanja u zavisnosti od efektivne deformacije za sve serije uzoraka grupe R_L su prikazane na dijagramu na slici 5.6. Na slici se može uočiti da nema prevelikog odstupanja zavisnosti $\beta(\varphi_e)$ za različite serije grupe uzoraka R_L. Takođe, na osnovu dijagrama na slici 5.6 zaključuje se da je model deformisanja R_L monoton, odnosno da se u toku procesa deformisanja naponsko stanje (opisano pokazateljem naponskog stanja β) ravnomerno menja. Uslov monotonosti procesa deformisanja za ovaj model deformisanja, kod svih serija je ispunjen.

5.2.2 SABIJANJE UZORAKA GRUPE C_L RAVNIM ALATIMA

Sabijanje uzoraka grupe C_L je za cilj imalo ispitivanje monotonosti ovog modela deformisanja kao i postizanje visokih vrednosti granične deformacije u oblasti pokazatelja naponskog stanja $\beta \approx -1$. Za eksperimentalna istraživanja je upotrebljeno 25 uzoraka sabijanih u 5 serija po 5 uzoraka (tabela 4.3). Kao sredstvo podmazivanja je korišćeno mineralno ulje. Uzorci jedne od serija sabijanja od nulte do poslednje faze su prikazani na slici 5.7 dok slika 5.7f prikazuje pukotinu ostvarenu na kraju procesa.



a) Početno stanje uzorka



b) Faza deformisanja I, s=5mm



c) Faza deformisanja II, s=8mm



d) Faza deformisanja III, s=11mm



e) Faza deformisanja IV, s=14mm



f) Faza deformisanja V, s=17mm

Slika 5.7 Izgled uzoraka grupe C_L po fazama

Za proračun logaritamskih deformacija primenjene su jednačine 4.5 i 4.6, a rezultati su prikazani u tabelama od 5.11 do 5.15.

Tabela 5.11 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 1 grupe C_L

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ Z ₀₃ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ Z ₃ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ d ₀₃ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ d ₃ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _θ
0	2,97 3,02 3,01	3,00	2,97 3,02 3,01	3,00	18,77 18,76 18,78	18,77	18,77 18,76 18,78	18,77	0,000	0,000
1	2,97 3,02 3,01	3,00	2,11 2,13 2,12	2,12	18,77 18,76 18,78	18,77	21,81 21,80 21,80	21,80	-0,347	0,150
2	2,098 3,00 3,05	3,01	1,59 1,60 1,60	1,60	18,81 18,80 18,79	18,80	24,35 24,30 24,31	24,33	-0,632	0,258
3	3,00 3,03 2,99	3,01	1,19 1,22 1,23	1,21	18,76 18,74 18,75	18,75	28,32 28,30 28,30	28,30	-0,911	0,412
4	3,00 3,00 3,06	3,02	0,80 0,84 0,83	0,82	18,80 18,80 18,80	18,80	33,92 33,90 33,89	33,90	-1,304	0,590
5	3,02 2,96 3,07	3,02	0,44 0,52 0,55	0,50	18,90 18,90 18,89	18,90	43,05 43,01 42,95	43,00	-1,798	0,822

Tabela 5.12 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 2 grupe C_L

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ Z ₀₃ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ Z ₃ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ d ₀₃ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ d ₃ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _θ
0	3,03 3,01 3,01	3,02	3,03 3,01 3,01	3,02	18,77 18,80 18,80	18,79	18,77 18,80 18,80	18,79	0,000	0,000
1	3,03 3,01 3,01	3,02	2,14 2,11 2,12	2,12	18,79 18,79 18,78	18,79	21,73 21,70 21,70	21,71	-0,354	0,144
2	3,04 3,04 3,04	3,04	1,61 1,66 1,65	1,64	18,85 18,88 18,86	18,86	24,55 24,60 24,50	24,54	-0,617	0,263
3	3,05 3,01 3,02	3,03	1,19 1,22 1,24	1,22	18,82 18,81 18,81	18,81	28,45 28,49 28,48	28,47	-0,910	0,414
4	3,02 3,04 3,03	3,03	0,93 0,97 0,93	0,94	18,78 18,77 18,78	18,78	34,35 34,40 34,42	34,39	-1,170	0,605
5	3,01 3,02 3,04	3,02	0,53 0,49 0,43	0,48	18,83 18,81 18,80	18,81	44,51 44,53 44,51	44,51	-1,839	0,861

Tabela 5.13 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 3 grupe C_L

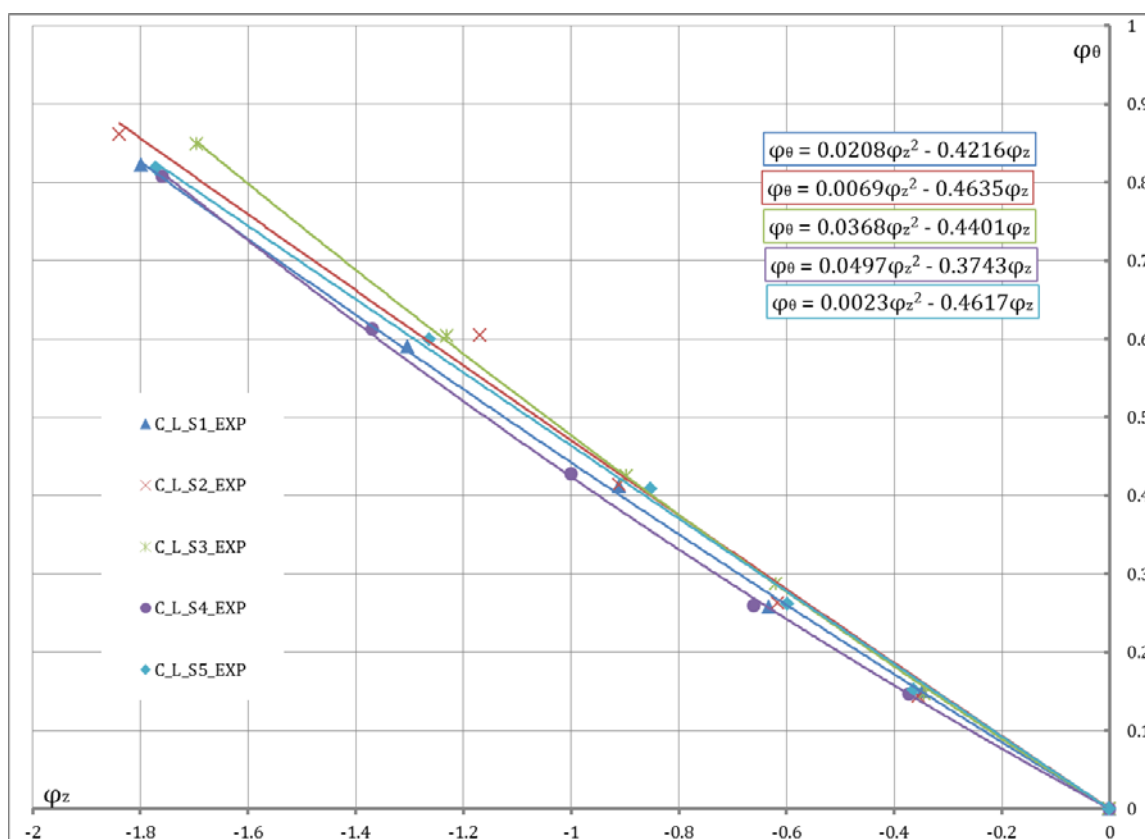
Br.	Z_{01} Z_{02} Z_{03} [mm]	Z_{0sr} [mm]	Z_1 Z_2 Z_3 [mm]	Z_{sr} [mm]	d_{01} d_{02} d_{03} [mm]	d_{0sr} [mm]	d_1 d_2 d_3 [mm]	d_{sr} [mm]	φ_z	φ_θ
0	3,02	3,02	3,02	3,02	18,79	18,76	18,79	18,76	0,000	0,000
	3,00		3,00		18,75		18,75			
	3,05		3,05		18,75		18,75			
1	3,02	3,02	2,14	2,14	18,75	18,76	21,71	21,73	-0,344	0,147
	3,00		2,16		18,76		21,73			
	3,05		2,13		18,77		21,75			
2	3,03	3,03	1,62	1,63	18,83	18,83	25,15	25,10	-0,620	0,287
	3,06		1,64		18,83		25,05			
	3,00		1,63		18,83		25,10			
3	3,03	3,02	1,15	1,23	18,82	18,81	28,78	28,78	-0,898	0,425
	3,01		1,31		18,81		28,77			
	3,03		1,22		18,81		28,78			
4	2,83	2,84	0,88	0,83	18,78	18,78	34,35	34,37	-1,230	0,604
	2,84		0,86		18,78		34,37			
	2,84		0,76		18,78		34,39			
5	3,03	3,00	0,57	0,55	18,80	18,82	44,02	44,00	-1,696	0,849
	3,02		0,52		18,82		44,01			
	2,94		0,55		18,84		43,96			

Tabela 5.14 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 4 grupe C_L

Br.	Z_{01} Z_{02} Z_{03} [mm]	Z_{0sr} [mm]	Z_1 Z_2 Z_3 [mm]	Z_{sr} [mm]	d_{01} d_{02} d_{03} [mm]	d_{0sr} [mm]	d_1 d_2 d_3 [mm]	d_{sr} [mm]	φ_z	φ_θ
0	3,05	3,05	3,05	3,05	18,86	18,86	18,86	18,86	0,000	0,000
	3,10		3,10		18,86		18,86			
	3,00		3,00		18,85		18,85			
1	3,05	3,05	2,11	2,10	18,85	18,86	24,85	21,84	-0,373	0,147
	3,10		2,09		18,87		21,85			
	3,00		2,10		18,86		21,83			
2	3,05	3,04	1,54	1,57	18,83	18,83	24,44	24,43	-0,661	0,260
	3,06		1,58		18,83		24,43			
	3,03		1,59		18,82		24,44			
3	3,32	3,02	1,08	1,11	18,81	18,83	28,90	28,90	-1,001	0,428
	3,02		1,16		18,85		28,91			
	3,01		1,09		18,83		28,88			
4	3,03	3,07	0,83	0,78	18,85	18,85	34,75	34,79	-1,370	0,613
	3,08		0,73		18,85		34,77			
	3,09		0,79		18,85		34,82			
5	3,00	3,02	0,50	0,52	18,82	18,81	42,22	42,19	-1,759	0,808
	3,00		0,50		18,80		42,15			
	3,05		0,55		18,80		42,18			

Tabela 5.15 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 5 grupe C_L

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ Z ₀₃ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ Z ₃ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ d ₀₃ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ d ₃ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _θ
0	2,96 2,99 2,98	2,98	2,96 2,99 2,98	2,98	18,95 18,86 18,89	18,90	17,90 17,93 17,87	18,90	0,000	0,000
1	2,96 2,99 2,98	2,98	2,96 2,99 2,98	2,98	18,90 18,95 18,86	18,90	22,00 22,00 22,02	22,01	-0,364	0,152
2	3,00 2,98 3,03	3,00	1,66 1,65 1,65	1,65	18,95 18,92 18,85	18,91	24,56 24,59 24,59	24,58	-0,598	0,262
3	2,99 2,96 3,00	2,98	1,24 1,32 1,25	1,27	18,88 18,92 18,90	18,90	28,45 28,39 28,44	28,44	-0,853	0,409
4	3,00 3,00 3,04	3,01	0,85 0,85 0,85	0,85	18,85 18,86 18,90	18,88	34,44 34,38 34,43	34,40	-1,264	0,600
5	2,95 3,01 3,03	3,00	0,51 0,51 0,51	0,51	18,91 18,92 18,90	18,91	42,85 42,83 42,83	42,83	-1,772	0,818



Slika 5.8 Put deformacije za grupu C_L

Na osnovu prethodno prikazanih tabela, konstruisani su putevi deformacija za ovu grupu uzoraka, slika 5.8.

Na slici 5.8 se uočava da su aproksimativne funkcije odnosa logaritamskih deformacija za sve grupe uzoraka grupe C_L vrlo bliske, što znači da su uslovi trenja bili približno isti pri sabijanju svakog uzorka.

Primenom jednačina od 4.1 do 4.10 proračunate su vrednosti faktora α , vrednosti pokazatelja naponskog stanja β i efektivne deformacije φ_e . Proračun je vršen za svaku fazu sabijanja, svake serije ispitivanih uzoraka i rezultati su dati u tabelama od 5.16 do 5.20.

Tabela 5.16 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 1 grupe uzoraka C_L

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-0,422	-1,048	-0,104	-1,152	0,000
1	-0,436	-1,040	-0,085	-1,125	0,348
2	-0,448	-1,033	-0,069	-1,102	0,636
3	-0,459	-1,026	-0,055	-1,081	0,912
4	-0,476	-1,016	-0,032	-1,048	1,306
5	-0,496	-1,003	-0,005	-1,008	1,800

Tabela 5.17 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 2 grupe uzoraka C_L

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-0,464	-10,23	-0,048	-1,075	0,000
1	-0,468	-1,021	-0,043	-1,064	0,356
2	-0,472	-1,018	-0,037	-1,055	0,619
3	-0,476	-1,016	-0,032	-1,048	0,911
4	-0,480	-1,013	-0,027	-1,040	1,170
5	-0,489	-1,007	-0,015	-1,022	1,840

Tabela 5.18 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 3 grupe uzoraka C_L

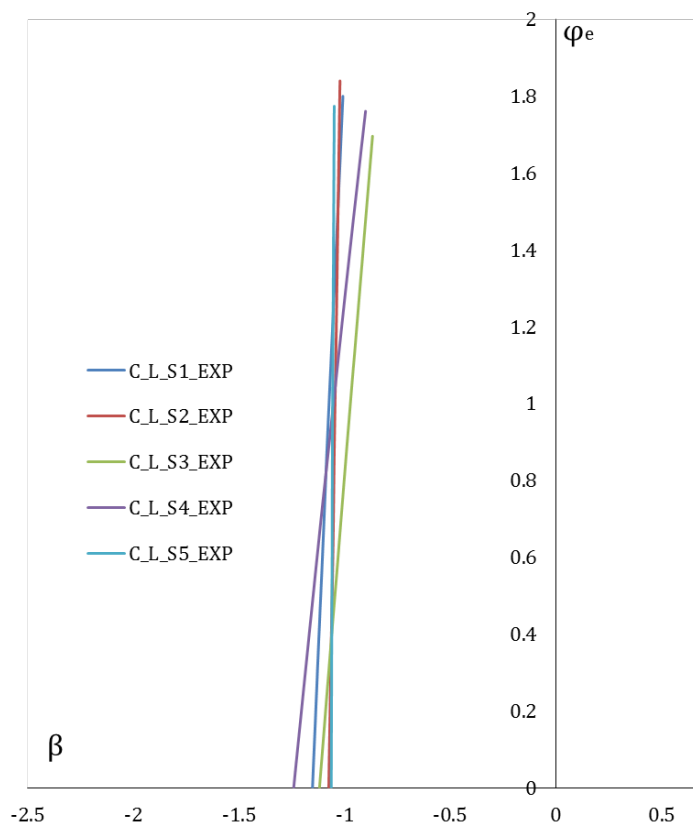
Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-0,440	-1,038	-0,080	-1,119	0,000
1	-0,465	-1,022	-0,047	-1,069	0,345
2	-0,486	-1,009	-0,019	-1,028	0,621
3	-0,506	-0,996	0,008	-0,988	0,898
4	-0,531	-0,979	0,041	-0,938	1,230
5	-0,565	-0,954	0,086	-0,868	1,696

Tabela 5.19 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 4 grupe uzoraka C_L

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-0,374	-1,073	-0,166	-1,241	0,000
1	-0,411	-1,054	-0,118	-1,172	0,376
2	-0,440	-1,038	-0,080	-1,118	0,666
3	-0,474	-1,017	-0,035	-1,052	1,004
4	-0,510	-0,993	0,013	-0,980	1,373
5	-0,549	-0,966	0,065	-0,901	1,761

Tabela 5.20 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 5 grupe uzoraka C_L

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-0,467	-1,021	-0,044	-1,063	0,000
1	-0,469	-1,020	-0,041	-1,061	0,366
2	-0,470	-1,019	-0,040	-1,059	0,600
3	-0,471	-1,019	-0,039	-1,058	0,853
4	-0,473	-1,018	-0,036	-1,054	1,265
5	-0,475	-1,016	-0,033	-1,049	1,774

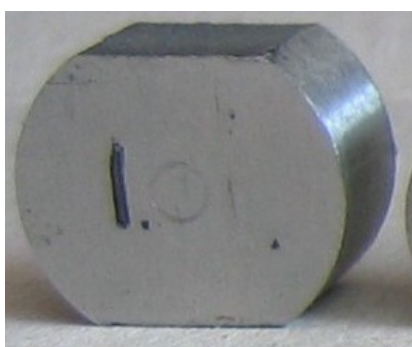


Slika 5.9 Promena pokazatelja naponskog stanja β u zavisnosti od efektivne deformacije φ_e za grupu uzoraka C_L

Na osnovu prikazanih tabela konstruisan je dijagram zavisnosti pokazatelja naponskog stanja i efektivne deformacije i prikazan je na slici 5.9. Na slici se može uočiti da je zavisnost $\beta(\varphi_e)$ za sve serije uzoraka približno ista. Takođe, uvidom u vrednosti pokazatelja naponskog stanja zaključuje se da je proces monoton. Poređenjem grafika na slikama 5.6 i 5.9 može se zaključiti da su kod oba modela deformisanja ostvarene približno iste vrednosti pokazatelja naponskog stanja, dok je u slučaju modela R_L ostvarena veća vrednost efektivne deformacije za približno 0,2.

5.2.3 SABIJANJE UZORAKA GRUPE C_Z RAVNIM ALATIMA

Predloženi model deformisanja C_Z je za cilj imao ispitivanje monotonosti u oblasti pokazatelja naponskog stanja od $-0,5$ do 0 . Ova pretpostavka polazi iz istraživanja prikazanih u radu [66] u kom je dat prikaz definisanja dijagrama granične deformabilnosti primenom aksijalno nesimetričnih uzoraka. Eksperiment je izveden na pet serija uzoraka pri čemu je svaka serija sačinjena od 5 uzoraka. Eksperiment je izvođen inkrementalno, svaki uzorak je sabijan za određeni stepen deformacije više nego prethodni dok je poslednji uzorak sabijan do pojave pukotine na spoljnoj površini a mineralno ulje je korišćeno kao lubrikant. Na slici 5.10 je dat prikaz uzoraka od nulte do poslednje faze sabijanja dok slika 5.10f prikazuje izgled pukotine.



a) Početno stanje uzorka



b) Faza deformisanja I, s=2mm



c) Faza deformisanja II, s=4mm



d) Faza deformisanja III, s=6mm



e) Faza deformisanja IV, s=9mm



f) Faza deformisanja V, s=13mm

Slika 5.10 Izgled uzoraka grupe C_Z po fazama

Primenom jednačina 4.5 i 4.6 izračunate su vrednosti logaritamskih deformacija i vrednosti su prikazane u tabelama od 5.21 do 5.25.

Tabela 5.21 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 1 grupe C_Z

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _x
0	2,89 2,94	2,92	2,98 2,94	2,92	3,06 3,09	3,08	3,06 3,09	3,08	0,000	0,000
1	2,89 2,94	2,92	1,71 1,72	1,72	3,06 3,09	3,08	4,91 4,8	4,85	-0,529	0,454
2	2,85 2,90	2,88	1,46 1,45	1,46	3,04 2,97	3,01	5,16 5,05	5,11	-0,679	0,529
3	2,93 2,94	2,94	1,37 1,35	1,36	3,14 3,08	3,11	5,78 5,71	5,75	-0,771	0,615
4	2,92 2,87	2,90	1,19 1,19	1,19	3,00 2,90	2,95	6,14 6,16	6,15	-0,891	0,735
5	3,00 2,98	2,99	0,98 1,25	1,00	3,07 3,17	3,12	7,68 7,65	7,67	-1,095	0,899

Tabela 5.22 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 2 grupe C_Z

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _x
0	2,84 2,85	2,85	2,84 2,85	2,85	2,93 2,92	2,93	2,93 2,92	2,93	0,000	0,000
1	2,84 2,85	2,85	1,64 1,58	1,61	2,93 2,92	2,93	4,56 4,57	4,57	-0,571	0,445
2	2,81 2,82	2,82	1,44 1,42	1,43	2,90 2,91	2,91	5,02 5,12	5,07	-0,679	0,555
3	2,89 2,91	2,90	1,36 1,31	1,34	2,93 2,96	2,95	5,49 5,78	5,64	-0,772	0,648
4	2,91 2,90	2,91	1,2 1,21	1,20	2,90 3,09	3,00	6,41 6,34	6,37	-0,886	0,753
5	2,93 2,97	2,95	0,93 0,92	0,92	2,94 2,96	2,95	7,66 7,68	7,67	-1,165	0,956

Tabela 5.23 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 3 grupe C_Z

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _x
0	3,07 2,87	2,97	3,07 2,87	2,97	3,08 2,93	3,01	3,08 2,93	3,01	0,000	0,000
1	3,07 2,87	2,97	1,64 1,73	1,68	3,08 2,93	3,01	4,66 4,93	4,80	-0,570	0,467
2	2,94 2,91	2,93	1,42 1,48	1,45	2,94 2,93	2,94	5,26 5,36	5,32	-0,703	0,593
3	2,90 2,91	2,91	1,33 1,34	1,33	2,95 2,91	2,93	5,68 5,69	5,69	-0,783	0,664
4	3,01 2,90	2,96	1,14 1,19	1,16	3,04 2,88	2,96	6,32 6,64	6,48	-0,937	0,784
5	2,90 2,92	2,91	0,86 0,89	0,88	2,93 2,90	2,92	8,06 7,98	8,02	-1,196	1,010

Tabela 5.24 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 4 grupe C_Z

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _x
0	3,15 3,04	3,10	2,86 2,82	2,84	3,12 3,01	3,07	2,90 2,87	2,89	0,000	0,000
1	3,15 3,04	3,10	1,62 1,60	1,61	3,12 3,01	3,07	4,68 4,62	4,65	-0,568	0,476
2	2,92 2,84	2,88	1,53 1,59	1,56	2,89 2,82	2,86	5,46 5,59	5,53	-0,674	0,579
3	2,93 2,76	2,85	1,35 1,43	1,39	2,94 2,73	2,84	6,04 5,88	5,92	-0,792	0,657
4	2,97 2,96	2,97	1,14 1,29	1,21	3,04 2,99	3,02	5,64 6,62	6,14	-0,871	0,761
5	2,90 2,96	2,93	1,00 1,02	1,01	2,89 2,91	2,90	7,88 7,53	7,71	-1,10	0,937

Tabela 5.25 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 5 grupe C_Z

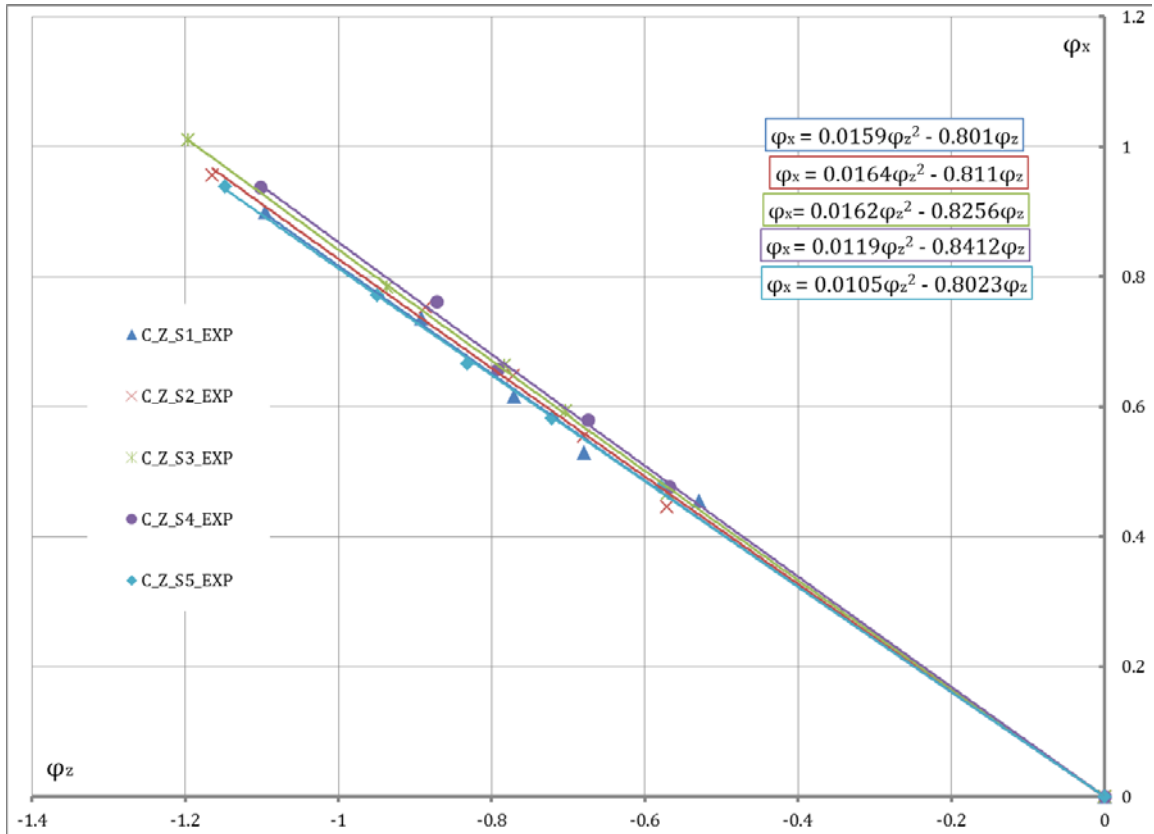
Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _x
0	3,15 3,04	3,10	3,15 3,04	3,10	3,12 3,01	3,07	3,12 3,01	3,07	0,000	0,000
1	3,15 3,04	3,10	1,74 1,73	1,74	3,12 3,01	3,07	5,08 4,8	4,94	-0,578	0,476
2	2,92 2,84	2,88	1,37 1,43	1,40	2,89 2,82	2,86	5,18 0,52	5,12	-0,721	0,582
3	2,93 2,76	2,85	1,27 1,22	1,24	2,94 2,73	2,84	5,71 5,34	5,53	-0,832	0,666
4	2,97 2,96	2,97	1,16 1,14	1,15	3,04 2,99	3,02	6,34 6,69	6,53	-0,949	0,771
5	2,90 2,96	2,93	0,94 0,92	0,93	2,89 2,91	2,90	7,69 7,13	7,41	-1,148	0,938

Tabela 5.26 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 1 grupe uzoraka C_Z

Uzorak	α	σ _z /K	σ _x /K	β	φ _e
0	-0,794	-0,794	-0,371	-0,393	0,000
1	-0,835	-0,724	0,416	-0,308	0,572
2	-0,846	-0,714	0,428	-0,286	0,713
3	-0,853	-0,708	0,436	-0,272	0,815
4	-0,863	-0,699	0,446	-0,253	0,952
5	-0,878	-0,686	0,462	-0,224	1,168

Tabela 5.27 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 2 grupe uzoraka C_Z

Uzorak	α	σ _z /K	σ _x /K	β	φ _e
0	-0,825	-0,825	-0,733	-0,325	0,000
1	-0,842	-0,718	0,424	-0,294	0,600
2	-0,845	-0,715	0,427	-0,288	0,723
3	-0,848	-0,713	0,431	-0,282	0,829
4	-0,851	-0,710	0,434	-0,276	0,956
5	-0,859	-0,703	0,442	-0,261	1,242



Slika 5.11 Put deformacije za grupu C_Z

Tabela 5.28 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 3 grupe uzoraka C_Z

Uzorak	α	σ_z/K	σ_x/K	β	φ_e
0	-0,857	-0,857	-0,704	-0,266	0,000
1	-0,852	-0,709	0,435	-0,274	0,608
2	-0,851	-0,710	0,434	-0,276	0,756
3	-0,850	-0,711	0,433	-0,278	0,844
4	-0,849	-0,712	0,432	-0,280	1,005
5	-0,846	-0,714	0,428	-0,266	1,287

Tabela 5.29 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 4 grupe uzoraka C_Z

Uzorak	α	σ_z/K	σ_x/K	β	φ_e
0	-0,873	-0,873	-0,690	-0,235	0,000
1	-0,869	-0,694	0,453	-0,241	0,610
2	-0,868	-0,695	0,452	-0,243	0,730
3	-0,867	-0,695	0,450	-0,245	0,847
4	-0,867	-0,695	0,450	-0,245	0,949
5	-0,865	-0,697	0,448	-0,249	1,189

Tabela 5.30 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 5 grupe uzoraka C_Z

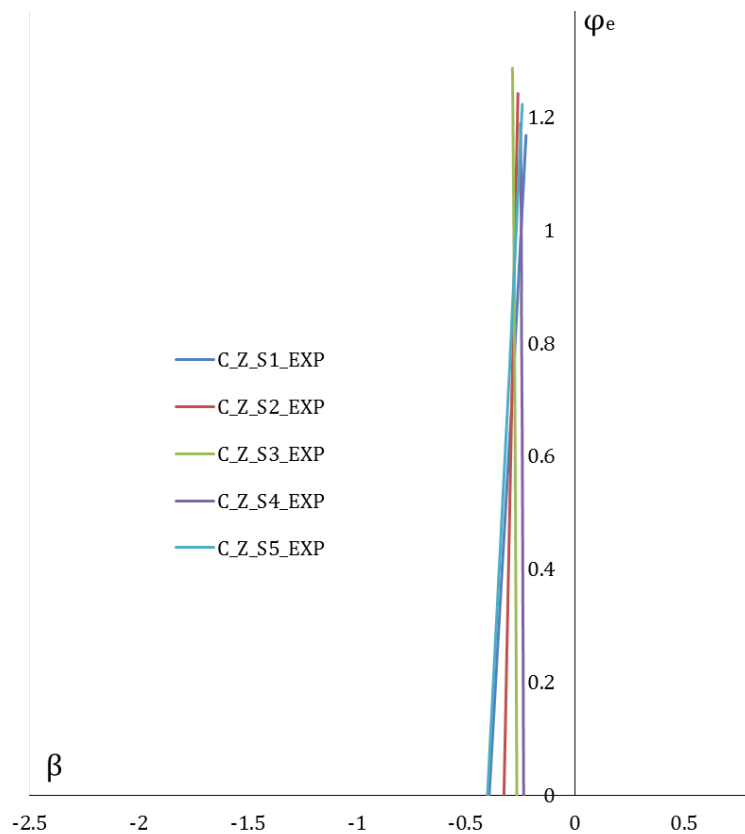
Uzorak	α	σ_z/K	σ_x/K	β	φ_e
0	-0,791	-0,791	-0,764	-0,401	0,000
1	-0,830	-0,729	0,411	-0,318	0,617
2	-0,840	-0,7220	0,422	-0,298	0,768
3	-0,847	-0,714	0,430	-0,284	0,881
4	-0,855	-0,706	0,438	-0,268	1,009
5	-0,889	-0,694	0,453	-0,241	1,223

Na osnovu vrednosti prikazanih u tabelama od 5.21 do 5.25 konstruisan je dijagram zavisnosti logaritamskih deformacija $\varphi_x - \varphi_z$ za sve serije ispitivanih uzoraka grupe C_Z i prikazan je na slici 5.11.

Posmatranjem slike 5.11 moguće je uočiti da su aproksimacije odnosa logaritamskih deformacija vrlo bliske.

Na osnovu aproksimacije zavisnosti logaritamskih deformacija izračunat je faktor α . Nakon toga, primenom jednačina od 4.1 do 4.10, određene su vrednosti potrebnih parametara kako bi se uspostavila veza između efektivne deformacije φ_e i pokazatelja naponskog stanja β . Izračunate vrednosti za svaku fazu deformisanja, za svih 5 serija, su prikazane u tabelama od 5.26 do 5.30.

Promena pokazatelja naponskog stanja u zavisnosti od efektivne deformacije za sve serije uzoraka grupe C_Z je prikazana u dijagramu na slici 5.12. Na slici se može uočiti da nema prevelikog odstupanja zavisnosti $\beta(\varphi_e)$ za različite serije grupe uzoraka C_Z. Takođe, na osnovu dijagrama na slici 5.12 zaključuje se da je model deformisanja C_Z monoton, odnosno da se u toku procesa deformisanja pokazatelj naponskog stanja β ne menja. Uslov monotonosti procesa deformisanja za ovaj model, kod svih serija je ispunjen.



Slika 5.12 Promena pokazatelja naponskog stanja β u zavisnosti od efektivne deformacije φ_e za grupu uzoraka C_Z

5.2.4 SABIJANJE UZORAKA GRUPE CO_KRA RAVNIM I KONUSNIM ALATIMA

Sabijanje uzoraka grupe CO_KRA je za cilj imalo ispitivanje monotonosti ovog modela deformisanja kao i postizanje visokih vrednosti granične deformacije u oblasti pozitivnih vrednosti pokazatelja naponskog stanja ($\beta \approx 0.4$). Za eksperimentalna istraživanja je upotrebljeno 25 uzoraka sabijanih u pet serija po 5 uzoraka. U svakoj seriji uzorci su sabijani za određeni stepen deformacije više u odnosu na prethodni. Merenja promene visine (z) i prečnika (d) krugova merne mrežice su vršena prema tabeli 4.3 (uzorak 5). Kao sredstvo podmazivanja je korišćeno mineralno ulje. Uzorci korišćeni u jednoj od serija pri sabijanju od nulte do poslednje faze su prikazani na slici 5.13, dok slika 5.13f prikazuje pukotinu ostvarenu na kraju procesa.

Na osnovu promene vrednosti visine i prečnika krugova merne mrežice na ekvatorijalnom pojasu, primenom jednačina 4.5 i 4.6 izračunate su vrednosti logaritamskih deformacija za sve serije ispitivanih uzoraka i prikazane su u tabelama od 5.31 do 5.35.



a) Početno stanje uzorka



b) Faza deformisanja I, $s=6\text{mm}$



c) Faza deformisanja II, $s=9\text{mm}$



d) Faza deformisanja III, $s=12\text{mm}$



e) Faza deformisanja IV, $s=15\text{mm}$



f) Faza deformisanja V, $s=18\text{mm}$

Slika 5.13 Izgled uzoraka grupe CO_KRA po fazama

Tabela 5.31 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 1 grupe CO_KRA

Br.	Z_{01} Z_{02} Z_{03} [mm]	Z_{0sr} [mm]	Z_1 Z_2 Z_3 [mm]	Z_{sr} [mm]	d_{01} d_{02} d_{03} [mm]	d_{0sr} [mm]	d_1 d_2 d_3 [mm]	d_{sr} [mm]	φ_z	φ_θ
0	4,89 4,81 4,77	4,82	4,89 4,81 4,77	4,82	4,77 4,69 4,74	4,73	4,77 4,69 4,74	4,73	0,000	0,000
1	4,89 4,81 4,77	4,82	4,18 4,18 4,22	4,19	4,77 4,69 4,74	4,73	5,50 5,40 5,46	5,45	-0,140	0,142
2	4,78 4,82 4,78	4,79	3,65 3,69 3,65	3,66	4,72 4,73 4,71	4,72	6,47 6,37 6,51	6,45	-0,269	0,312
3	4,87 4,83 4,79	4,83	3,33 3,26 3,25	3,28	4,79 4,77 4,71	4,76	7,38 7,39 7,37	7,38	-0,387	0,439
4	4,86 4,81 4,78	4,82	3,06 3,17 3,08	3,10	4,76 4,84 4,78	4,79	8,08 8,03 8,11	8,07	-0,441	0,522
5	4,62 4,84 4,74	4,73	2,82 2,81 2,83	2,82	4,62 4,90 4,76	4,76	8,75 8,70 8,70	8,72	-0,517	0,605

Tabela 5.32 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 2 grupe CO_KRA

Br.	Z_{01} Z_{02} Z_{03} [mm]	Z_{0sr} [mm]	Z_1 Z_2 Z_3 [mm]	Z_{sr} [mm]	d_{01} d_{02} d_{03} [mm]	d_{0sr} [mm]	d_1 d_2 d_3 [mm]	d_{sr} [mm]	φ_z	φ_θ
0	5,01 5,02 5,01	5,01	5,01 5,02 5,01	5,01	5,01 5,02 5,01	5,01	5,01 5,02 5,01	5,01	0,000	0,000
1	5,02 4,99 5,00	5,00	4,38 4,35 4,34	4,36	5,02 4,99 5,00	5,00	6,00 5,77 5,69	5,82	-0,137	0,152
2	4,99 4,98 4,98	4,98	3,72 3,77 3,75	3,75	4,99 4,98 4,98	4,98	6,85 6,98 6,88	6,90	-0,284	0,326
3	4,98 5,00 4,99	4,99	3,35 3,32 3,30	3,32	4,98 5,00 4,99	4,99	7,83 7,71 7,80	7,78	-0,407	0,444
4	5,00 5,01 5,02	5,01	2,98 3,08 3,09	3,05	5,00 5,01 5,02	5,01	8,88 8,65 8,70	8,74	-0,496	0,556
5	5,01 5,01 5,01	5,01	2,80 2,82 2,78	2,80	5,01 5,01 5,01	5,01	9,48 9,64 9,50	9,54	-0,582	0,644

Tabela 5.33 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 3 grupe CO_KRA

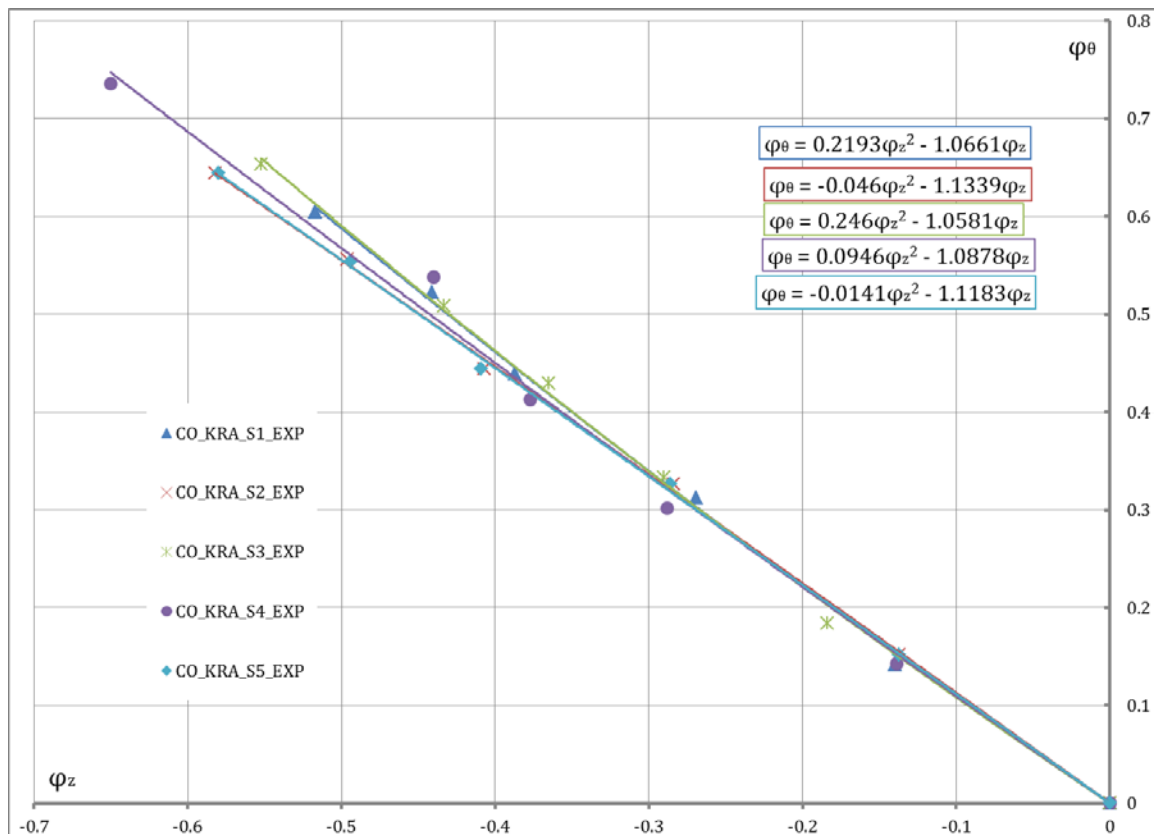
Br.	Z_{01} Z_{02} Z_{03} [mm]	Z_{0sr} [mm]	Z_1 Z_2 Z_3 [mm]	Z_{sr} [mm]	d_{01} d_{02} d_{03} [mm]	d_{0sr} [mm]	d_1 d_2 d_3 [mm]	d_{sr} [mm]	φ_z	φ_θ
0	4,98 4,99 4,98	4,98	4,98 4,99 4,98	4,98	4,98 4,99 4,98	4,98	4,98 4,99 4,98	4,98	0,000	0,000
1	4,99 5,02 5,00	5,00	4,15 4,19 4,15	4,16	4,99 5,02 5,00	5,00	6,02 6,03 5,99	6,01	-0,184	0,184
2	5,02 5,01 5,01	5,01	3,79 3,70 3,75	3,75	5,02 5,01 5,01	5,01	7,02 6,95 6,99	6,99	-0,290	0,333
3	5,01 5,01 4,99	5,00	3,48 3,45 3,48	3,47	5,01 5,01 4,99	5,00	7,71 7,68 7,65	7,68	-0,365	0,429
4	5,01 5,00 5,02	5,01	3,25 3,28 3,22	3,25	5,01 5,00 5,02	5,01	8,25 8,32 8,43	8,33	-0,433	0,508
5	5,00 4,98 5,01	5,00	2,86 2,88 2,89	2,88	5,00 4,98 5,01	5,00	9,66 9,61 9,55	9,61	-0,552	0,653

Tabela 5.34 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 4 grupe CO_KRA

Br.	Z_{01} Z_{02} Z_{03} [mm]	Z_{0sr} [mm]	Z_1 Z_2 Z_3 [mm]	Z_{sr} [mm]	d_{01} d_{02} d_{03} [mm]	d_{0sr} [mm]	d_1 d_2 d_3 [mm]	d_{sr} [mm]	φ_z	φ_θ
0	5,02 5,01 5,00	5,01	5,02 5,01 5,00	5,01	5,02 5,01 5,00	5,01	5,02 5,01 5,00	5,01	0,000	0,000
1	5,01 4,98 5,02	5,00	4,33 4,37 4,34	4,35	5,01 4,98 5,02	5,00	5,76 5,75 5,80	5,77	-0,139	0,143
2	4,98 5,00 4,99	4,99	3,70 3,78 3,74	3,74	4,98 5,00 4,99	4,99	6,76 6,71 6,77	6,75	-0,288	0,302
3	5,00 4,99 5,01	5,00	3,45 3,42 3,41	3,43	5,00 4,99 5,01	5,00	7,61 7,51 7,56	7,56	-0,377	0,413
4	4,99 5,00 5,00	5,00	3,18 3,25 3,22	3,22	4,99 5,00 5,00	5,00	8,51 8,62 8,54	8,56	-0,440	0,538
5	5,00 5,02 4,98	5,00	2,56 2,58 2,68	2,61	5,00 5,02 4,98	5,00	10,77 10,32 10,24	10,44	-0,650	0,736

Tabela 5.35 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 5 grupe CO_KRA

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ Z ₀₃ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ Z ₃ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ d ₀₃ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ d ₃ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _θ
0	5,01 5,00 5,02	5,01	5,02 5,01 5,01	5,01	5,02 5,01 5,01	5,01	5,02 5,01 5,01	5,01	0,000	0,000
1	4,98 5,02 5,01	5,00	4,40 4,34 4,38	4,37	4,99 5,00 5,05	5,02	5,77 5,69 6,00	5,83	-0,135	0,150
2	5,00 4,99 4,98	4,99	3,80 3,72 3,75	3,76	5,05 4,98 4,98	5,00	6,98 6,88 6,85	6,88	-0,283	0,319
3	4,99 5,01 5,00	5,00	3,36 3,33 3,35	3,35	5,00 4,99 4,99	4,99	7,71 7,80 7,83	7,75	-0,400	0,440
4	5,00 5,00 4,99	5,00	3,12 3,09 2,05	3,09	5,01 5,00 5,00	5,00	8,65 8,70 8,88	8,78	-0,481	0,563
5	5,02 4,98 5,00	5,00	2,82 2,85 2,80	2,82	5,01 4,95 5,01	4,98	9,64 9,50 9,55	9,60	-0,573	0,656



Slika 5.14 Put deformacije za grupu CO_KRA

Na slici 5.14 je prikazan odnos logaritamskih deformacija u dva pravca φ_{θ} – φ_z kao i aproksimacija polinomom drugog reda, za svaku seriju grupe uzoraka CO_KRA. Na osnovu slike 5.14 moguće je

zaključiti da je odnos logaritamskih deformacija za svih pet serija ove grupe uzoraka približno isti. Shodno tome, dolazi se do zaključka da su za svaku grupu uzoraka ostvareni slični tribološki uslovi.

Primenom jednačina od 4.1 do 4.10 izračunate su vrednosti faktora α , vrednosti pokazatelja naponskog stanja β i efektivne deformacije φ_e . Proračun je vršen za svaku fazu sabijanja svake serije ispitivanih uzoraka i rezultati su dati u tabelama od 5.36 do 5.40.

Tabela 5.36 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 1 grupe uzoraka CO_KRA

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-1,066	-0,521	0,631	0,124	0,000
1	-1,128	-0,471	0,678	0,207	0,163
2	-1,184	-0,427	0,716	0,289	0,338
3	-1,236	-0,388	0,748	0,360	0,480
4	-1,260	-0,371	0,762	0,391	0,562
5	-1,293	-0,348	0,781	0,433	0,654

Tabela 5.37 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 2 grupe uzoraka CO_KRA

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-1,134	-0,466	0,682	0,216	0,000
1	-1,121	-0,476	0,673	0,197	0,168
2	-1,108	-0,487	0,664	0,177	0,355
3	-1,096	-0,496	0,654	0,158	0,493
4	-1,088	-0,503	0,649	0,146	0,610
5	-1,080	-0,510	0,643	0,133	0,711

Tabela 5.38 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 3 grupe uzoraka CO_KRA

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-1,058	-0,528	0,626	0,126	0,000
1	-1,149	-0,454	0,692	0,238	0,212
2	-1,201	-0,414	0,726	0,312	0,362
3	-1,238	-0,387	0,750	0,363	0,463
4	-1,271	-0,363	0,768	0,405	0,548
5	-1,330	-0,322	0,798	0,476	0,703

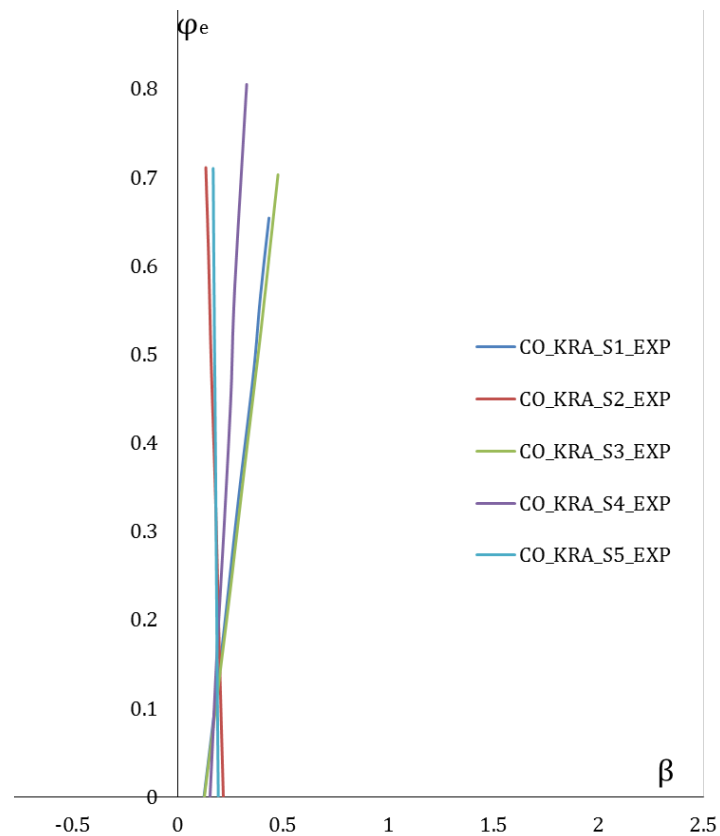
Tabela 5.39 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 4 grupe uzoraka CO_KRA

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-1,088	-0,503	0,649	0,153	0,000
1	-1,114	-0,482	0,668	0,186	0,163
2	-1,142	-0,460	0,688	0,228	0,341
3	-1,159	-0,446	0,699	0,253	0,458
4	-1,171	-0,437	0,707	0,270	0,573
5	-1,211	-0,407	0,734	0,327	0,805

Tabela 5.40 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 5 grupe uzoraka CO_KRA

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-1,086	-0,479	0,671	0,140	0,000
1	-1,117	-0,479	0,666	0,160	0,165
2	-1,151	-0,452	0,693	0,241	0,349
3	-1,178	-0,431	0,711	0,280	0,487
4	-1,197	-0,417	0,724	0,307	0,608
5	-1,218	-0,402	0,736	0,335	0,714

Na osnovu prikazanih tabela konstruisan je dijagram zavisnosti pokazatelja naponskog stanja i efektivne deformacije i prikazan je na slici 5.15.



Slika 5.15 Promena pokazatelja naponskog stanja β u zavisnosti od efektivne deformacije φ_e za grupu uzoraka CO_KRA

5.2.5 SABIJANJE UZORAKA GRUPE C_3D RAVNIM ALATIMA

Pri sabijanju uzoraka grupe C_3D ravnim alatima cilj je bio ostvariti što je moguće više vrednosti granične deformacije pri konstantnoj vrednosti pokazatelja naponskog stanja u oblasti $1 < \beta < 1,5$. Za eksperimentalna istraživanja je korišćeno 25 uzoraka, sabijanih u pet serija po 5 uzoraka. Uzorci korišćeni u jednoj seriji sabijanja od nulte do poslednje faze, su prikazani na slici 5.16 dok slika 5.16f prikazuje pukotinu ostvarenu na kraju procesa. Mineralno ulje je korišćeno kao lubrikant.



a) Početno stanje uzorka



b) Faza deformisanja I, s=4mm



c) Faza deformisanja II, s=8mm



d) Faza deformisanja III, s=12mm



e) Faza deformisanja IV, s=16mm



f) Faza deformisanja V, s=19mm

Slika 5.16 Izgled uzoraka grupe C_3D po fazama

Primenom jednačina 4.5 i 4.6 izračunate su vrednosti logaritamskih deformacija i prikazane su u tabelama od 5.41 do 5.45.

Tabela 5.41 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 1 grupe C_3D

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ Z ₀₃ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ Z ₃ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ d ₀₃ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ d ₃ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _θ
0	2,980 2,900 2,950	2,94	2,980 2,900 2,950	2,94	13,95 13,95 13,94	13,95	13,95 13,95 13,94	13,95	0,000	0,000
1	2,980 2,900 2,950	2,94	2,840 2,850 2,840	2,84	13,95 13,95 13,94	13,95	15,15 15,14 15,16	15,15	-0,035	0,083
2	2,930 2,980 2,960	2,96	2,770 2,805 2,800	2,79	13,93 13,94 13,93	13,93	16,22 16,25 16,25	16,24	-0,059	0,153
3	2,980 2,980 2,950	2,97	2,740 2,710 2,720	2,72	14,05 14,06 14,05	14,06	18,51 18,52 18,48	18,50	-0,088	0,274
4	2,97 2,98 2,97	2,97	2,610 2,600 2,580	2,60	14,07 14,03 14,06	14,06	21,25 21,20 21,20	21,22	-0,133	0,412
5	2,91 2,94 3,05	2,97	2,350 2,400 2,360	2,37	13,93 13,92 13,93	13,93	26,45 26,32 26,42	26,40	-0,226	0,639

Tabela 5.42 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 2 grupe C_3D

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ Z ₀₃ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ Z ₃ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ d ₀₃ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ d ₃ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _θ
0	2,910 2,920 2,940	2,92	2,910 2,920 2,940	2,92	13,96 13,96 13,96	13,96	13,96 13,96 13,96	13,96	0,000	0,000
1	2,910 2,910 2,940	2,92	2,800 2,820 2,820	2,81	13,90 13,90 13,91	13,90	15,08 15,09 15,08	15,08	-0,038	0,081
2	2,950 2,920 2,990	2,95	2,770 2,750 2,770	2,76	13,92 13,92 13,91	13,92	16,58 16,58 16,60	16,59	-0,067	0,175
3	2,950 2,950 2,970	2,96	2,630 2,710 2,710	2,68	13,85 13,86 13,85	13,85	18,31 18,30 18,30	18,30	-0,099	0,279
4	2,93 2,95 2,96	2,95	2,550 2,570 2,580	2,57	13,88 13,88 13,88	13,88	21,30 21,31 21,30	21,30	-0,138	0,428
5	2,95 2,96 2,97	2,96	2,340 2,220 2,370	2,31	13,98 13,99 13,98	13,98	28,03 28,00 27,98	28,00	-0,248	0,695

Tabela 5.43 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 3 grupe C_3D

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ Z ₀₃ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ Z ₃ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ d ₀₃ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ d ₃ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _θ
0	2,960 2,950 3,000	2,97	2,960 2,950 3,000	2,97	13,92 13,92 13,92	13,92	13,92 13,921 3,92	13,92	0,000	0,000
1	2,960 2,950 3,000	2,97	2,950 2,950 2,900	2,93	13,92 13,92 13,92	13,92	15,01 15,02 15,01	15,01	-0,014	0,075
2	2,950 2,960 3,010	2,97	2,850 2,800 2,830	2,83	13,92 13,93 13,93	13,93	16,26 16,25 16,26	16,26	-0,048	0,155
3	2,920 2,930 2,970	2,94	2,690 2,640 2,680	2,67	13,95 13,94 13,95	13,95	18,41 18,42 18,41	18,41	-0,096	0,277
4	3,03 3,03 3,06	3,04	2,660 2,620 2,600	2,63	13,93 13,92 13,93	13,93	21,07 21,08 21,06	21,07	-0,145	0,414
5	2,91 3,00 2,97	2,96	2,400 2,330 2,420	2,38	13,95 13,94 13,94	13,94	26,32 26,33 26,32	26,32	-0,218	0,636

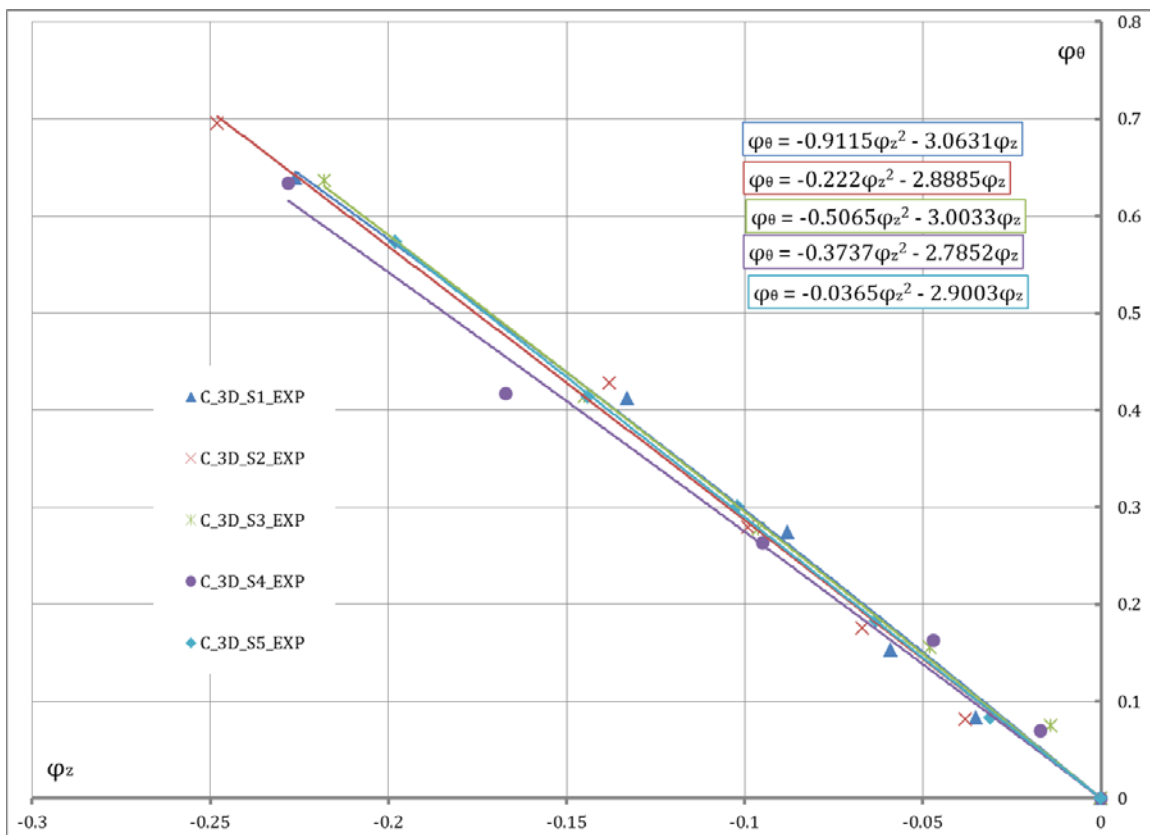
Tabela 5.44 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 4 grupe C_3D

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ Z ₀₃ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ Z ₃ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ d ₀₃ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ d ₃ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _θ
0	2,990 2,980 2,960	2,98	2,990 2,980 2,960	2,98	13,95 13,96 13,96	13,96	13,96 13,96 13,96	13,96	0,000	0,000
1	2,990 2,980 2,960	2,98	2,910 2,920 2,950	2,93	13,95 13,96 13,96	13,96	14,97 14,98 14,97	14,97	-0,017	0,070
2	3,050 3,000 3,010	3,02	2,890 2,850 2,900	2,88	13,94 13,95 13,94	13,94	16,41 16,40 16,40	16,40	-0,047	0,163
3	3,000 2,990 2,990	2,99	2,740 2,700 2,730	2,72	13,92 13,92 13,92	13,92	18,10 18,11 18,10	18,10	-0,095	0,263
4	3,070 3,031 3,060	3,05	2,560 2,580 2,600	2,58	13,97 13,98 13,97	13,97	21,25 21,20 21,18	21,20	-0,167	0,417
5	3,012 3,010 2,972	2,99	2,400 2,380 2,370	2,38	13,92 13,92 13,92	13,92	26,25 26,28 26,22	26,25	-0,228	0,634

Tabela 5.45 Eksperimentalne vrednosti za uzorke serije 5 grupe C_3D

Br.	Z ₀₁ Z ₀₂ Z ₀₃ [mm]	Z _{0sr} [mm]	Z ₁ Z ₂ Z ₃ [mm]	Z _{sr} [mm]	d ₀₁ d ₀₂ d ₀₃ [mm]	d _{0sr} [mm]	d ₁ d ₂ d ₃ [mm]	d _{sr} [mm]	φ _z	φ _θ
0	2,950 2,940 2,940	2,94	2,950 2,940 2,940	2,94	13,91 13,91 13,91	13,91	13,91 13,91 13,91	13,91	0,000	0,000
1	2,950 2,940 2,940	2,94	2,840 2,870 2,840	2,85	13,91 13,91 13,91	13,91	15,11 15,13 15,11	15,11	-0,031	0,083
2	2,970 2,930 2,960	2,95	2,800 2,760 2,750	2,77	13,90 13,91 13,91	13,91	16,71 16,70 16,70	16,70	-0,063	0,183
3	2,980 2,980 2,990	2,98	2,720 2,700 2,660	2,69	13,91 13,92 13,91	13,91	18,81 18,80 18,80	18,80	-0,102	0,301
4	2,98 2,99 2,97	2,98	2,570 2,580 2,590	2,58	13,90 13,85 13,88	13,88	21,03 21,00 20,98	21,00	-0,144	0,414
5	2,96 2,95 2,94	2,95	2,440 2,420 2,400	2,42	13,91 13,92 13,93	13,92	24,68 24,65 24,70	24,68	-0,198	0,573

Na slici 5.17 je prikazan odnos logaritamskih deformacija u dva pravca φ_θ - φ_z kao i aproksimacija polinomom drugog reda za svaku seriju grupe uzoraka C_3D.



Slika 5.17 Put deformacije za grupu C_3D

Primenom jednačina od 4.1 do 4.10 proračunate su vrednosti faktora α kao i vrednosti pokazatelja naponskog stanja β i efektivne deformacije φ_e . Proračun je vršen za svaku fazu sabijanja, svake serije ispitivanih uzoraka i rezultati su dati u tabelama od 5.46 do 5.50.

Tabela 5.46 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 1 grupe uzoraka C_3D

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-3,063	0,227	1,095	1,310	0,000
1	-2,999	0,218	1,091	1,309	0,083
2	-2,956	0,212	1,089	1,301	0,154
3	-2,903	0,204	1,086	1,290	0,280
4	-2,821	0,191	1,080	1,271	0,421
5	-2,651	0,162	1,071	1,233	0,648

Tabela 5.47 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 2 grupe uzoraka C_3D

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-2,889	0,202	1,086	1,280	0,000
1	-2,872	0,199	1,083	1,282	0,081
2	-2,859	0,197	1,082	1,279	0,177
3	-2,845	0,195	1,082	1,277	0,283
4	-2,827	0,192	1,080	1,272	0,437
5	-2,778	0,184	1,078	1,262	0,704

Tabela 5.48 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 3 grupe uzoraka C_3D

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-3,003	0,219	1,093	1,316	0,000
1	-2,989	0,217	1,092	1,309	0,080
2	-2,955	0,212	1,090	1,302	0,159
3	-2,906	0,205	1,089	1,294	0,281
4	-2,856	0,197	1,084	1,281	0,420
5	-2,782	0,185	1,080	1,265	0,646

Tabela 5.49 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 4 grupe uzoraka C_3D

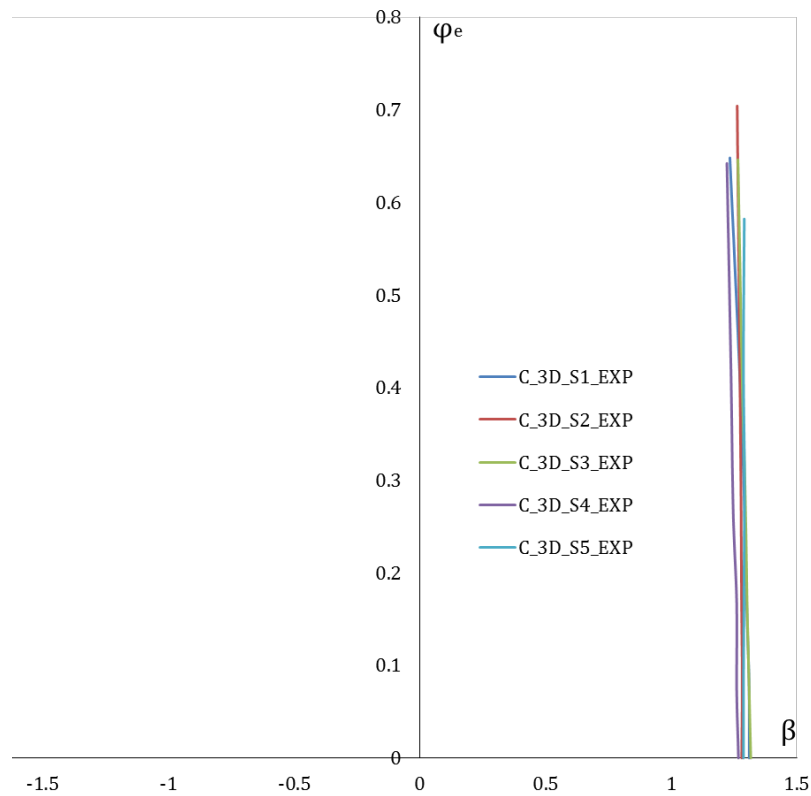
Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-2,785	0,185	1,077	1,267	0,000
1	-2,772	0,183	1,077	1,260	0,073
2	-2,750	0,180	1,080	1,260	0,168
3	-2,714	0,173	1,073	1,246	0,266
4	-2,660	0,164	1,073	1,237	0,420
5	-2,615	0,155	1,066	1,221	0,642

Tabela 5.50 Efektivna deformacija i pokazatelj naponskog stanja za seriju 5 grupe uzoraka C_3D

Uzorak	α	σ_z/K	σ_θ/K	β	φ_e
0	-2,900	0,204	1,088	1,287	0,000
1	-2,898	0,203	1,084	1,287	0,084
2	-2,896	0,203	1,086	1,289	0,186
3	-2,893	0,203	1,088	1,291	0,306
4	-2,890	0,202	1,085	1,287	0,420
5	-2,886	0,202	1,088	1,290	0,582

Promena pokazatelja naponskog stanja u zavisnosti od efektivne deformacije za sve serije uzoraka grupe C_3D je prikazana na dijagramu na slici 5.18. Na slici se može uočiti da nema prevelikog odstupanja zavisnosti $\beta(\varphi_e)$ za različite serije uzoraka C_3D. Takođe, na osnovu dijagrama na slici 5.18 zaključuje se da je model deformisanja C_3D monoton, odnosno da se u

toku procesa pokazatelj naponskog stanja β ne menja. Uslov monotonosti procesa deformisanja za ovaj model deformisanja, kod svih serija je ispunjen.



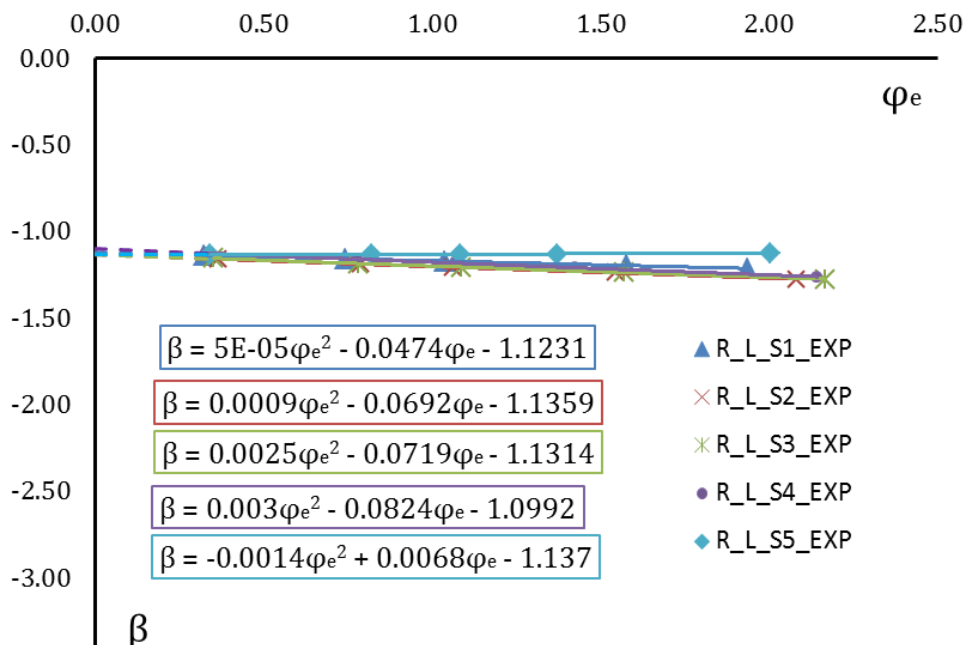
Slika 5.18 Promena pokazatelja naponskog stanja β u zavisnosti od efektivne deformacije φ_e za grupu uzoraka C_3D

5.3 ISTORIJA POKAZATELJA NAPONSKOG STANJA PRIKAZANIH MODELA DEFORMISANJA I POLOŽAJ NA DGD-u

Novi monotoni modeli deformisanja prikazani u disertaciji primenjeni su kako bi se konstruisao dijagram granične deformabilnosti. Kao što je navedeno, za određivanje granične deformabilnosti ne može biti merodavna vrednost pokazatelja β na kraju procesa, već se u obzir mora uzeti tok procesa, tj. istorija deformisanja. Zbog toga se uvodi pojam srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja β_{sr} [5] koji se određuje prema izrazu 4.11 dok je granična deformacija računata prema izrazu 4.10. Zavisnost $\beta(\varphi_e)$ je određena eksperimentalno i izvršena je aproksimacija dobijenih podataka. Na bazi te zavisnosti je određen β_{sr} .

5.3.1. GRUPA UZORAKA R_L

Na slici 5.19 date su eksperimentalne tačke za grupu uzoraka R_L kao i aproksimativne funkcije $\beta=f(\varphi_e)$ za sve serije ispitivanih uzoraka. Ovaj model ima za cilj postizanje visokih vrednosti granične deformacije pri konstantnim vrednostima pokazatelja naponskog stanja $\beta_{sr} \approx -1,2$.



Slika 5.19 Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka R_L

Eksperimentalno određeni parovi tačaka su aproksimirani polinomom drugog reda, pa se pokazatelj naponskog stanja može izraziti kao $\beta = A\varphi_e^2 + B\varphi_e + C$. Na osnovu dijagrama na slici 5.19 se može uočiti da su tokovi istorije pokazatelja naponskog stanja kao i vrednosti granične efektivne deformacije kod svih uzoraka ujednačeni. Ovo ukazuje na dobru ponovljivost rezultata prilikom sabijanja uzoraka istih polaznih dimenzija.

U tabeli 5.51 dat je zbirni pregled aproksimativnih analitičkih oblika funkcija $\beta(\varphi_e)$, graničnih vrednosti deformacije φ_e^g i srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja β_{sr} za eksperiment sabijanja grupe uzoraka R_L ravnim alatima, određenim prema metodologiji prikazanoj u poglavlju 4.3.

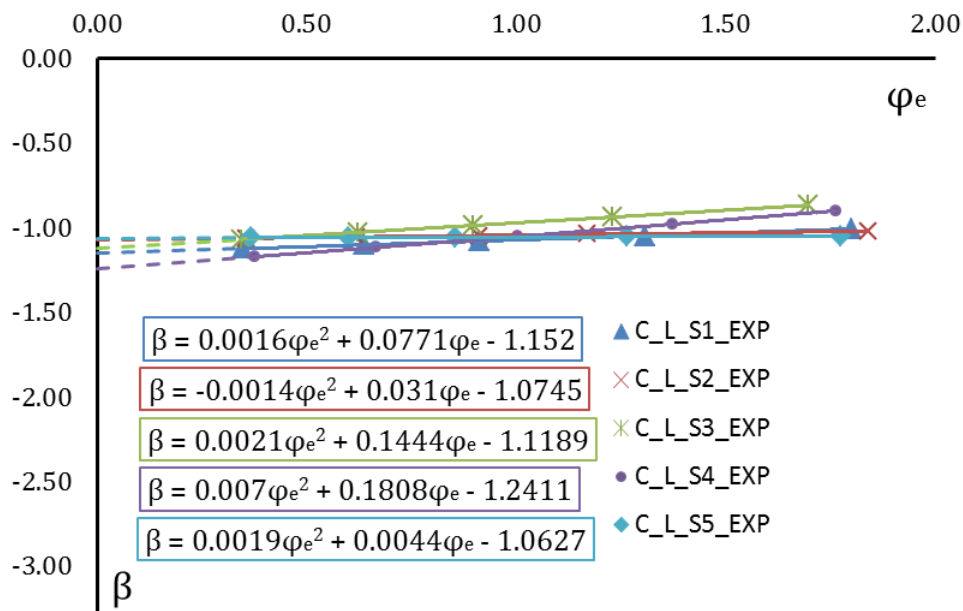
Tabela 5.51 Pregled rezultata za grupu uzoraka R_L

R_L	Aproksimativna funkcija $\beta = A\varphi_e^2 + B\varphi_e + C$	β_{sr}	φ_e^g
Seriya 1	$\beta = 5E-05\varphi_e^2 - 0,0474\varphi_e - 1,1231$	-1,215	1,934
Seriya 2	$\beta = 0,0009\varphi_e^2 - 0,0692\varphi_e - 1,1395$	-1,276	2,082
Seriya 3	$\beta = 0,0025\varphi_e^2 - 0,0719\varphi_e - 1,1314$	-1,276	2,167
Seriya 4	$\beta = 0,003\varphi_e^2 - 0,0824\varphi_e - 1,0992$	-1,262	2,140
Seriya 5	$\beta = -0,0014\varphi_e^2 - 0,0068\varphi_e - 1,137$	-1,129	2,003

Posmatranjem tabele 5.51 se može zaključiti da su sve serije ispitivanog modela grupisane u oblasti pokazatelja naponskog stanja $\beta_{sr} \approx -1,3$ i efektivne granične deformacije $\varphi_e^g \approx 2,1$. Takođe, ovaj model deformisanja je pokazao dobru ponovljivost rezultata, što se vidi iz malog rasipanja rezultata svih 5 serija.

5.3.2. UZORCI GRUPE C_L

Model sabijanja C_L ima za cilj postizanja visokih vrednosti granične deformacije pri vrednosti $\beta_{sr} \approx -1$. Slika 5.20 prikazuje eksperimentalne tačke kao i aproksimativne funkcije $\beta = f(\varphi_e)$ za sve serije ispitivanih uzoraka ove grupe.



Slika 5.20 Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka C_L

Na osnovu slike 5.20 može se zaključiti da je izgled istorije pokazatelja naponskog stanja za svih pet serija ove grupe uzoraka približno isti, što implicira da su uslovi deformisanja bili podjednaki u svim serijama deformisanja.

U tabeli 5.52 date su aproksimativne funkcije $\beta=f(\varphi_e)$, granične vrednosti efektivne deformacije φ_e^g i srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja β_{sr} za grupu uzoraka C_L određenih prema metodologiji prikazanoj u poglavlju 4.3.

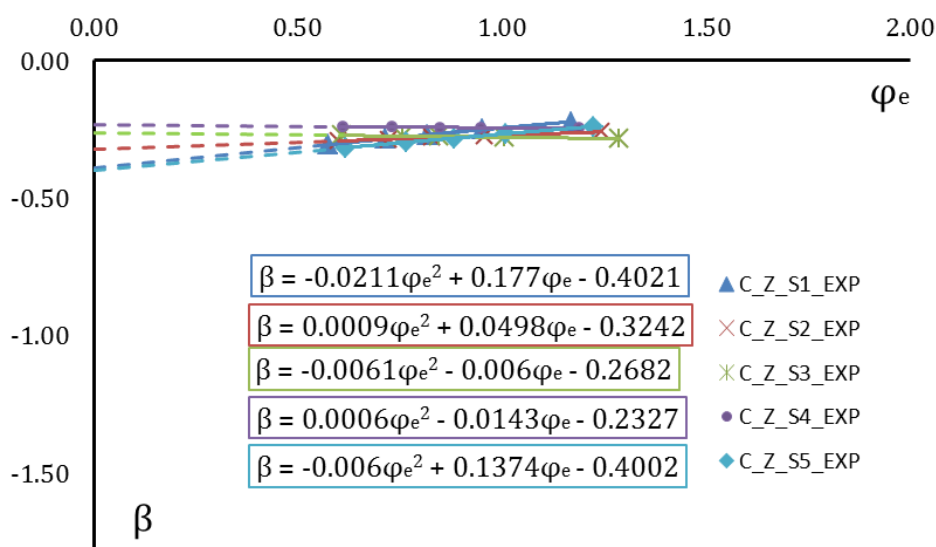
Tabela 5.52 Pregled rezultata za grupu uzoraka C_L

C_L	Aproksimativna funkcija $\beta = A\varphi_e^2+B\varphi_e+C$	β_{sr}	φ_e^g
Seriya 1	$\beta = 0,0016\varphi_e^2+0,0771\varphi_e-1,152$	-1,008	1,8
Seriya 2	$\beta = -0,0014\varphi_e^2+0,031\varphi_e-1,0745$	-1,022	1,84
Seriya 3	$\beta = 0,0021\varphi_e^2+0,1444\varphi_e-1,1189$	-0,868	1,696
Seriya 4	$\beta = 0,007\varphi_e^2+0,1808\varphi_e-1,2411$	-0,901	1,761
Seriya 5	$\beta = 0,0019\varphi_e^2+0,0044\varphi_e-1,0627$	-1,049	1,774

Na osnovu tabele 5.52 se može zaključiti da svih 5 serija ispitivanog modela deformisanja imaju dobru ponovljivost rezultata i da su sve serije grupisane u uskoj oblasti pokazatelja naponskog stanja $\beta_{sr}\approx-1,0$ i efektivne granične deformacije $\varphi_e^g\approx 1.8$.

5.3.3. GRUPA UZORAKA C_Z

Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka C_Z kao i aproksimativne funkcije zavisnosti $\beta=f(\varphi_e)$ su prikazane na slici 5.21.



Slika 5.21 Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka C_Z

Na dijagramu prikazanom na slici 5.21 može se uočiti da su tokovi istorije pokazatelja naponskog stanja kod svih uzoraka ujednačeni, kao i vrednosti granične efektivne deformacije. Ovo ukazuje na dobru ponovljivost rezultata prilikom sabijanja uzoraka svih pet serija.

U tabeli 5.53 dat je zbirni pregled aproksimativnih analitičkih oblika funkcija $\beta(\varphi_e)$, graničnih vrednosti deformacije φ_e^g i srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja β_{sr} , za eksperiment sabijanja grupe uzoraka R_L ravnim alatima, određenim prema metodologiji prikazanoj u poglavlju 4.3.

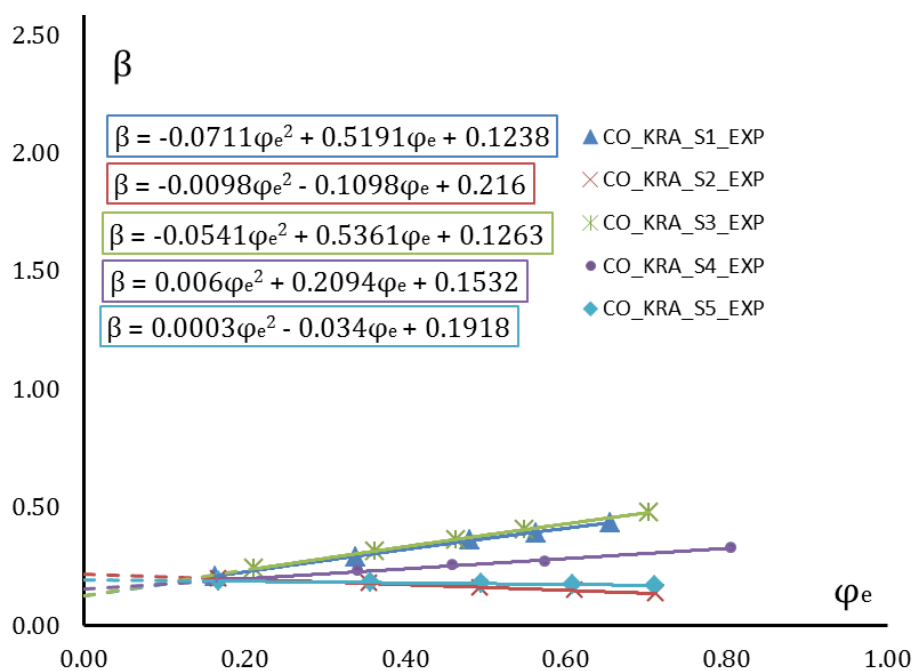
Tabela 5.53 Pregled rezultata za grupu uzoraka C_Z

C_Z	Aproksimativna funkcija $\beta = A\varphi_e^2 + B\varphi_e + C$	β_{sr}	φ_e^g
Seriya 1	$\beta = -0,0211\varphi_e^2 + 0,177\varphi_e - 0,4021$	-0,224	1,168
Seriya 2	$\beta = 0,0009\varphi_e^2 + 0,0498\varphi_e - 0,3242$	-0,261	1,242
Seriya 3	$\beta = -0,0061\varphi_e^2 - 0,006\varphi_e - 0,2682$	-0,286	1,287
Seriya 4	$\beta = 0,0006\varphi_e^2 - 0,0143\varphi_e - 0,2327$	-0,249	1,189
Seriya 5	$\beta = -0,006\varphi_e^2 + 0,13749\varphi_e - 0,4002$	-0,241	1,223

Svih 5 serija ispitivanog modela pokazuju dobro slaganje rezultata i grupisani su oblasti pokazatelja naponskog stanja $\beta_{sr} \approx -0.25$ i efektivne granične deformacije $\varphi_e^g \approx 1.2$.

5.3.4. GRUPA UZORAKA CO_KRA

Na slici 5.22 date su eksperimentalne tačke za grupu uzoraka CO_KRA kao i aproksimativne funkcije $\beta=f(\varphi_e)$ za sve serije ispitivanih uzoraka. Ovaj model ima za cilj postizanje visokih vrednosti granične deformacije pri približno konstantnim vrednostima srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja $\beta_{sr} \approx +0,4$.



Slika 5.22 Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka CO_KRA

Na slici 5.22 može se uočiti da postoji mala razlika u istoriji pokazatelja naponskog stanja za svih 5 serija ispitivanih uzoraka. Razlog tome mogu biti nejednaki uslovi trenja na kontaktnim površinama ili saosnost alata.

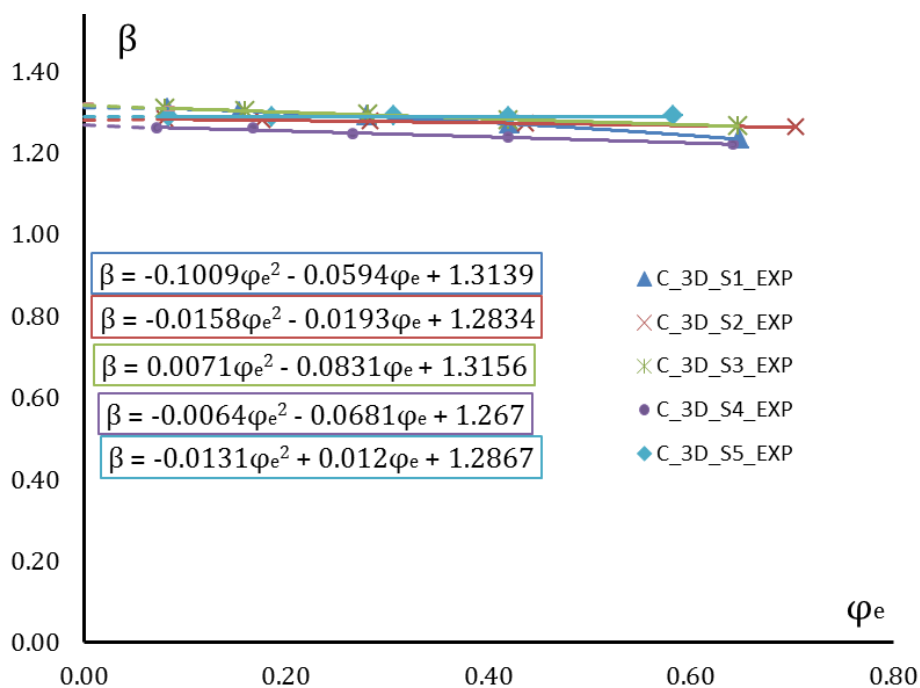
Tabela 5.54 Pregled rezultata za grupu uzoraka CO_KRA

CO_KRA	Aproksimativna funkcija $\beta = A\varphi_e^2 + B\varphi_e + C$	β_{sr}	φ_e^g
Seriya 1	$\beta -0,0711\varphi_e^2 + 0,5191\varphi_e + 0,1238$	0,433	0,654
Seriya 2	$\beta -0,0098\varphi_e^2 + 0,1098\varphi_e + 0,216$	0,133	0,711
Seriya 3	$\beta -0,0541\varphi_e^2 + 0,5361\varphi_e + 0,1236$	0,476	0,703
Seriya 4	$\beta -0,006\varphi_e^2 + 0,2094\varphi_e + 0,1532$	0,327	0,805
Seriya 5	$\beta -0,0003\varphi_e^2 + 0,034\varphi_e + 0,1918$	0,168	0,710

U tabeli 5.54 date su aproksimativne funkcije $\beta=f(\varphi_e)$, granične vrednosti efektivne deformacije φ_e^g i srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja β_{sr} za grupu uzoraka CO_KRA određenih prema metodologiji prikazanoj u poglavlju 4.3.

5.3.5. GRUPA UZORAKA C_3D

Model sabijanja C_3D ima za cilj postizanje visokih vrednosti granične deformacije pri vrednosti $\beta_{sr} \approx 1,3$. Slika 5.23 prikazuje eksperimentalne tačke kao i aproksimativne funkcije $\beta=f(\varphi_e)$ za sve serije ispitivanih uzoraka ove grupe.



Slika 5.23 Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka C_3D

Na slici 5.23 može se uočiti da su tokovi istorije pokazatelja naponskog stanja kod svih uzoraka ujednačeni kao i vrednosti granične efektivne deformacije. Ovo ukazuje na dobru ponovljivost rezultata prilikom sabijanja uzoraka svih pet serija.

U tabeli 5.55 dat je zbirni pregled aproksimativnih analitičkih oblika funkcija $\beta(\varphi_e)$, graničnih vrednosti deformacije φ_e^g i srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja β_{sr} za eksperiment sabijanja grupe uzoraka C_3D ravnim alatima.

Tabela 5.55 Pregled rezultata za grupu uzoraka C_3D

C_3D	Aproksimativna funkcija $\beta = A\varphi_e^2 + B\varphi_e + C$	β_{sr}	φ_e^g
Seriya 1	$\beta = -0,1099\varphi_e^2 - 0,0594\varphi_e + 1,3139$	1,233	0,648
Seriya 2	$\beta = -0,0158\varphi_e^2 - 0,0193\varphi_e + 1,2834$	1,262	0,704
Seriya 3	$\beta = 0,0071\varphi_e^2 - 0,0831\varphi_e + 1,3156$	1,265	0,646
Seriya 4	$\beta = -0,0064\varphi_e^2 - 0,0681\varphi_e + 1,267$	1,221	0,642
Seriya 5	$\beta = -0,0131\varphi_e^2 - 0,012\varphi_e + 1,2867$	1,290	0,582

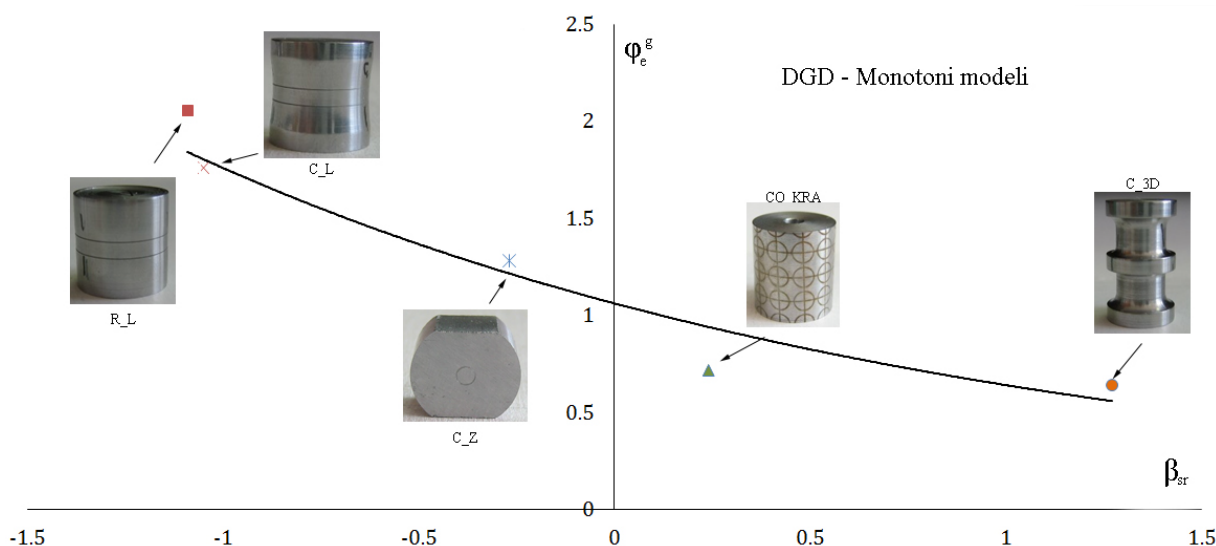
5.4 KONSTRUKCIJA DIJAGRAMA GRANIČNE DEFORMABILNOSTI PRIMENOM MONOTONIH MODELA DEFORMISANJA

Za konstruisanje dijagrama granične deformabilnosti prvenstveno su korišćena tri osnovna modela deformisanja i to slobodno sabijanje valjka, čisto uvijanje i zatezanje [4]. Na ovaj način konstruisan je dijagram granične deformabilnosti u intervalu $-1 < \beta < +1$. Međutim, istraživanja prikazana u radu [5] ukazuju na mogućnost ostvarenja veće vrednosti efektivne granične deformacije pri vrednostima pokazatelja naponskog stanja $+1$. U ovom slučaju su autori umesto testa jednoosnog zatezanja primenili test sabijanja cilindra s prstenom (poglavlje 2). U poglavlju 2 su takođe prikazani razni modeli deformisanja koji su se koristili za dopunu ovakvog dijagrama granične deformabilnosti.

Definisanje dijagrama granične deformabilnosti u ovoj disertaciji izvršeno je sa stanovišta povezivanja graničnih deformacija prema metodologiji objašnjenom u prethodnom poglavlju. Međutim, pri konstrukciji dijagrama granične deformabilnosti mora se ukazati i na teškoće koje neizbežno prate ova istraživanja, a koja se prvenstveno odnose na precizno utvrđivanje naponskog i deformacionog stanja u zoni nastanka pukotine.

Zbog toga je u ovoj disertaciji istraživana mogućnost primene novih, monotoni modela deformisanja za određivanje dijagrama granične deformabilnosti. Kod ovih modela je jednostavno odrediti naponsko-deformaciono stanje, što znatno olakšava i povećava tačnost procedure definisanja dijagrama granične deformabilnosti.

Na slici 5.24 je prikazan dijagram granične deformabilnosti konstruisan primenom novih modela deformisanja koji su detaljno predstavljeni u ovom radu. Za svaki model je u dijagram unesena po jedna tačka koja predstavlja srednju vrednost za pokazatelj naponskog stanja i granične deformacije, tabela 5.56.



Slika 5.24 Dijagram granične deformabilnosti za čelik C45E konstruisan primenom novih monotoni modela deformisanja

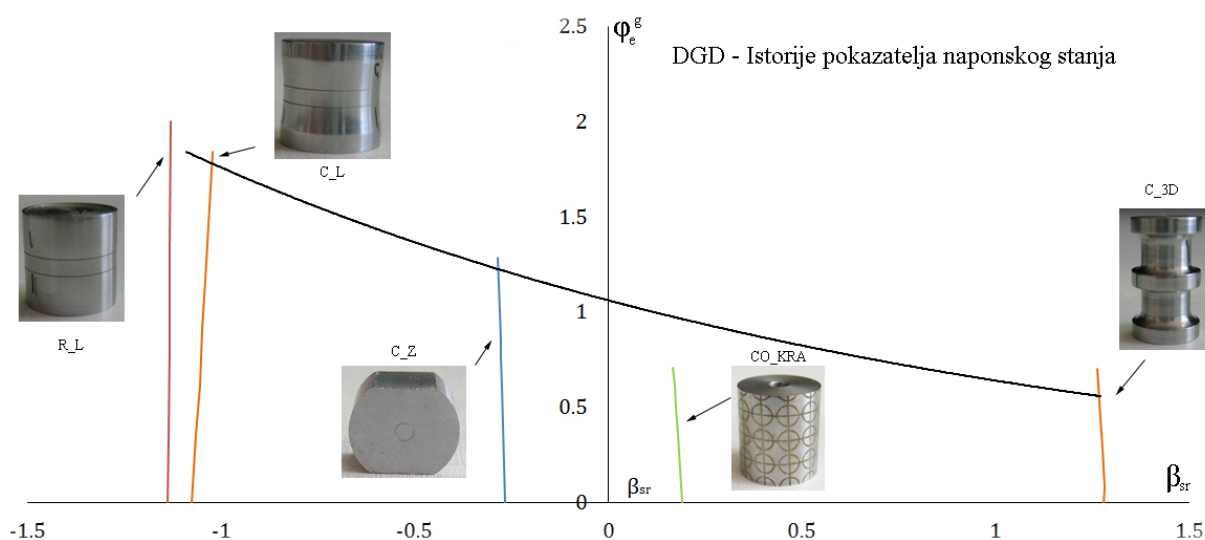
Tabela 5.56 Srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja i granične deformacije za ispitivane modele deformisanja

Grupa uzoraka	β_{sr}	$\varphi_{e^{g_{sr}}}$
R_L	-1,09	2,055
C_L	-1,05	1,76
C_Z	-0,27	1,28
CO_KRA	0,24	0,717
C_3D	1,27	0,64

Istorije pokazatelja naponskog stanja za sve ispitivane modele su prikazane na slici 5.25. Za svaki model ucrtana je srednja vrednost istorije pokazatelja naponskog stanja prema tabeli 5.57. Na osnovu slike 5.25 je moguće konstatovati da je kod svih ispitivanih modela ispunjen uslov monotonosti.

Tabela 5.57 Srednje vrednosti istorije pokazatelja naponskog stanja

R_L		C_L		C_Z		CO_KRA		C_3D	
β_{sr}	$\varphi_{e^{g_{sr}}}$	β_{sr}	$\varphi_{e^{g_{sr}}}$	β_{sr}	$\varphi_{e^{g_{sr}}}$	β_{sr}	$\varphi_{e^{g_{sr}}}$	β_{sr}	$\varphi_{e^{g_{sr}}}$
-1.134	0	-1.131	0	-0.331	0	0.145	0	1.307	0
-1.148	0.341	-1.1	0.357	-0.278	0.603	0.19	0.173	1.297	0.079
-1.166	0.783	-1.077	0.625	-0.266	0.737	0.234	0.35	1.292	0.169
-1.179	1.071	-1.052	0.912	-0.257	0.843	0.267	0.477	1.278	0.284
-1.196	1.499	-1.02	1.271	-0.247	0.975	0.289	0.58	1.256	0.423
-1.219	2.055	-0.976	1.776	-0.224	1.218	0.323	0.717	1.228	0.645



Slika 5.25 Istorije pokazatelja naponskog stanja ispitivanih modela u dijagramu granične deformabilnosti

6. PRIMENA METODE KONAČNIH ELEMENATA U ANALIZI DEFORMABILNOSTI MATERIJALA

U ovoj doktorskoj disertaciji je pored eksperimentalnih istraživanja monotonih procesa deformisanja prikazanih u prethodnim poglavljima izvršena i numerička analiza istih modela metodom konačnih elemenata (MKE). Kako bi se u potpunosti shvatila ideja primene numeričke analize u procesima obrade deformisanjem, u ovom poglavlju će biti prikazane njene teorijske osnove.

6.1 OSNOVE METODE KONAČNIH ELEMENATA

Metoda konačnih elemenata spada u metodu diskretne analize i za razliku od ostalih numeričkih metoda, koje se zasnivaju na matematičkoj diskretizaciji jednačina graničnih problema, MKE se zasniva na fizičkoj diskretizaciji razmatranog područja. Umesto elementa diferencijalno malih dimenzija, osnovu za sva proučavanja predstavlja deo područja konačnih dimenzija, manje područje ili konačni element. Zbog toga su osnovne jednačine pomoću kojih se opisuje stanje u pojedinim elementima, a pomoću kojih se formuliše i problem u celini, umesto diferencijalnih ili integralnih, obične algebarske.

Sa stanovišta fizičke interpretacije, to znači da se razmatrano područje, kao kontinuum s beskonačno mnogo stepeni slobode, zamenjuje diskretnim modelom međusobno povezanih konačnih elemenata, s konačnim brojem stepeni slobode. S obzirom na to da je broj diskretnih modela za jedan granični problem neograničeno veliki, osnovni zadatak je da se izabere onaj model koji najbolje aproksimira odgovarajući granični problem.

Metoda konačnih elemenata predstavlja numerički postupak rešavanja inženjerskih problema i problema matematičke fizike. Teorijske osnove ove metode su postavljene pedesetih godina prošlog veka, ali je metoda konačnih elemenata svoju praktičnu primenu našla tek s intenzivnijom primenom računara [41]. Metoda konačnih elemenata danas važi za najzastupljeniji metod koji se primenjuje u skoro svim naukama kao i inženjerskim oblastima. Razlog tome je zapravo njena opštost, koja joj omogućuje primenu kako na oblast solida tako i na oblast fluida, provođenje toplote, itd. MKE je takođe primenljiva na linearne i nelinearne probleme, a primenom računara

moguće je rešavanje velikih i komplikovanih sistema jednačina. Proces simulacije je sastavljen od nekoliko faza, prva faza predstavlja idealizaciju, odnosno pretvaranje fizičkog modela u matematički. Nakon toga sledi diskretizacija modela i na kraju rešenje.

Metoda konačnih elemenata je metoda diskretne analize i zasniva se na fizičkoj diskretizaciji posmatranog kontinuuma. Takav model se sastoji od konačnih elemenata koji su povezani u čvornim tačkama, što model s beskonačnim brojem stepeni slobode svodi na problem s konačnim brojem stepeni slobode. Za svaki konačni element odnosno čvornu tačku postavljaju se odgovarajuće jednačine a njihovom kombinacijom se dobijaju jednačine čitave zapremine.

Suština aproksimacije kontinuuma po metodi konačnih elemenata se sastoji pre svega u podeli posmatranog domena kontinuuma na poddomene konačnih dimenzija koji se nazivaju konačni elementi. Ti konačni elementi se međusobno povezuju konačnim brojem tačaka koji se zovu čvorovi. Interpolacionim funkcijama koje su unapred zadate funkcije za jedan tip konačnog elementa se opisuje stanje promenljive svakog konačnog elementa. Te interpolacione funkcije zapravo uspostavljaju vezu između vrednosti promenljive polja u bilo kojoj tački konačnog elementa s vrednostima promenljive u čvornim tačkama [42].

Od izbora interpolacionih funkcija zavisi ispunjenje kontinuiteta između pojedinih elemenata. Prema tome da li jesu ili nisu zadovoljeni uslovi kontinuiteta odnosno kompatibilnosti na granicama između pojedinih elemenata, elementi mogu biti kompatibilni i nekompatibilni odnosno komforni i nekomforni. U metodi konačnih elemenata se uglavnom koriste polinomi kao interpolacione funkcije i to: Lagrange-ovi polinomi, Serendipitz funkcije i Hermite-ovi polinomi.

Analiza i rešavanje problema metodom konačnih elemenata uvek se svodi na takozvani proces korak po korak, što je od velikog praktičnog značaja za primenu računara u efektivnom proračunu. U tom procesu koji se može predstaviti kao jednostavan algoritam (slika 6.1), izdvaja se šest koraka:

1. diskretizacija kontinuuma,
2. izbor interpolacionih funkcija,
3. računanje karakteristika elemenata,
4. formiranje jednačina na mrežu konačnih elemenata,
5. numeričko rešavanje sistema jednačin,
6. proračun potrebnih uticaja.

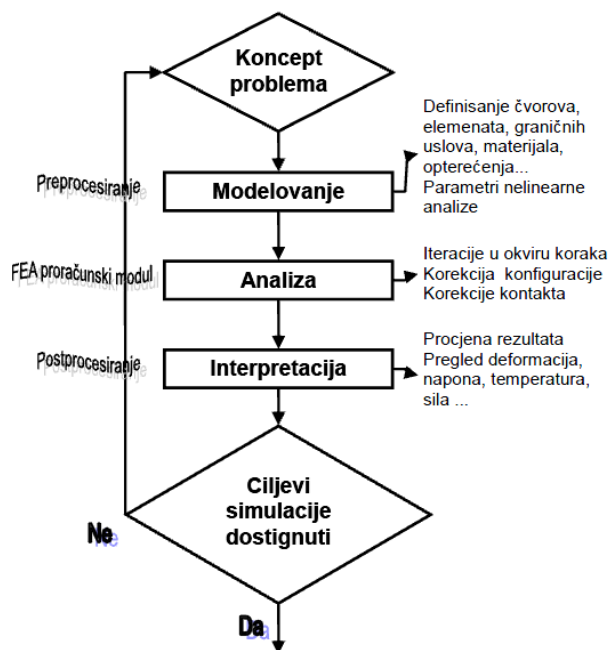
Od navedenih šest koraka, prva tri su naročito važna. Način diskretizacije, izbor oblika elementa, kao i ukupnog broja elemenata, zavise od prirode problema koji se rešava i potreba tačnosti traženog rešenja. Pored broja i oblika elemenata važan je i izbor čvorova, osnovnih nepoznatih u njima i interpolacionih funkcija. Pomoću interpolacionih funkcija se definiše polje promenljivih u svakom elementu. Od njihovog izbora neposredno zavisi i kontinuitet na granicama između pojedinih elemenata, a samim tim i tačnost aproksimacije. Promenljive u elementu mogu biti skalarne, vektorske ili tenzorske veličine.

Karakteristike pojedinih elemenata određuju se nezavisno od mreže elemenata kao celine. Matrica krutosti se formira autonomno za pojedine elemente, a potom na osnovu njih, sasvim

jednostavno, formira se matrica za sistem u celini. S obzirom na to da je geometrija elemenata po pravilu jednostavna, to praktično znači da se kompleksan problem razbija na niz jednostavnih.

Posljednja tri koraka, iako su za praktične proračune od velikog značaja, danas spadaju u okvire rutinskog posla, koji je prilagođen automatskom radu računara.

U praktičnom smislu algoritam za rešavanje određenog problema metodom konačnih elemenata se može slikovito predstaviti kao na slici 6.1.



Slika 6.1 Algoritam za rešavanja zadatog problema metodom konačnih elemenata [41]

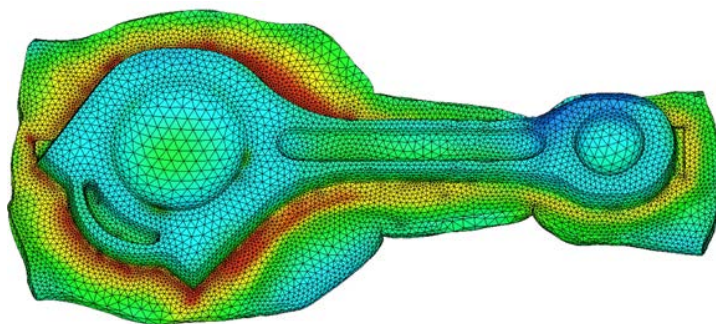
Na osnovu slike 6.1 se može zaključiti da se procedura rešavanja konkretnog problema metodom konačnih elemenata sastoji iz šest faza. Prvenstveno je potrebno postaviti problem koji zahteva rešenje. Nakon toga, potrebno je izvršiti pripremu same simulacije (preprocesiranje). Sama numerička analiza predstavlja procesiranje, dok se pod postprocesiranjem podrazumeva obrada rezultata ostvarenih numeričkom analizom. Na osnovu rezultata moguće je kreirati odgovarajući izveštaj i utvrditi da li su rezultati prihvatljivi ili ne.

6.2 FORMIRANJE MODELA PRIMENOM METODE KONAČNIH ELEMENATA

Kako bi se procedura proračuna po metodi konačnih elemenata najbolje razumela, potrebno je specificovati redosled koraka u samoj proceduri.

6.2.1. DISKRETIZACIJA DOMENA

Metoda konačnih elemenata se zasniva na fizičkoj diskretizaciji posmatranog domena. Ideja je da se prostorni problem podeli, odnosno diskretizuje na poddomene na koje je moguće primeniti osnovna znanja i iskustva iz mehanike kontinuuma i numeričke matematike. Poddomeni zapravo predstavljaju konačne elemente i analiza sistema tih spregnutih konačnih elemenata omogućava numeričku simulaciju odziva kontinuuma na zadate pobude. Fizičke veličine koje su obuhvaćene modelom dobijaju se u diskretnom obliku, tj. u tačkama koje proizilaze iz diskretizacije. Ove tačke zovu se čvorne tačke ili jednostavno čvorovi. Čvorovi mogu biti spoljašnji ili eksterni i unutrašnji ili interni. U spoljašnjim čvorovima element je vezan sa susednim elementima, dok unutrašnji čvorovi pripadaju samo jednom elementu i u njima nema veze s drugim elementima. Skup čvorova i elemenata se naziva mreža, slika 6.2. Na slici 6.2 dat je prikaz podele jedne klipnjače na konačne elemente.

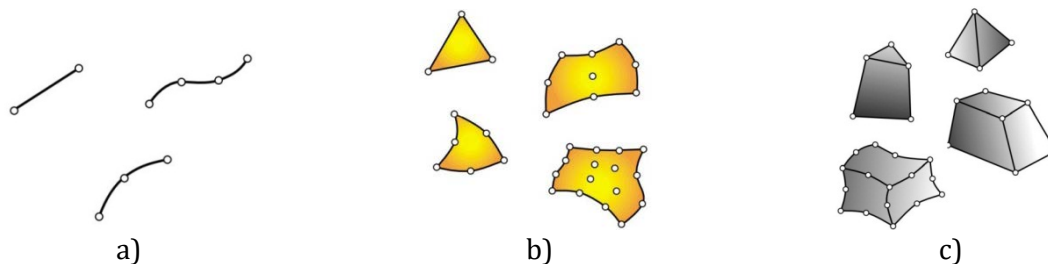


Slika 6.2 Mreža konačnih elemenata u slučaju kovanja klipnjače [41]

Na ovaj način, prostorni domen kontinuuma s beskonačnim brojem stepeni slobode se zamenjuje diskretnim sistemom s konačnim brojem stepeni slobode i analizira se metodom diskretne analize. U matematičkoj formulaciji ovo znači da se razmatrani problem prevodi iz područja analize u područje algebre.

6.2.2 IZBOR KONAČNIH ELEMENATA

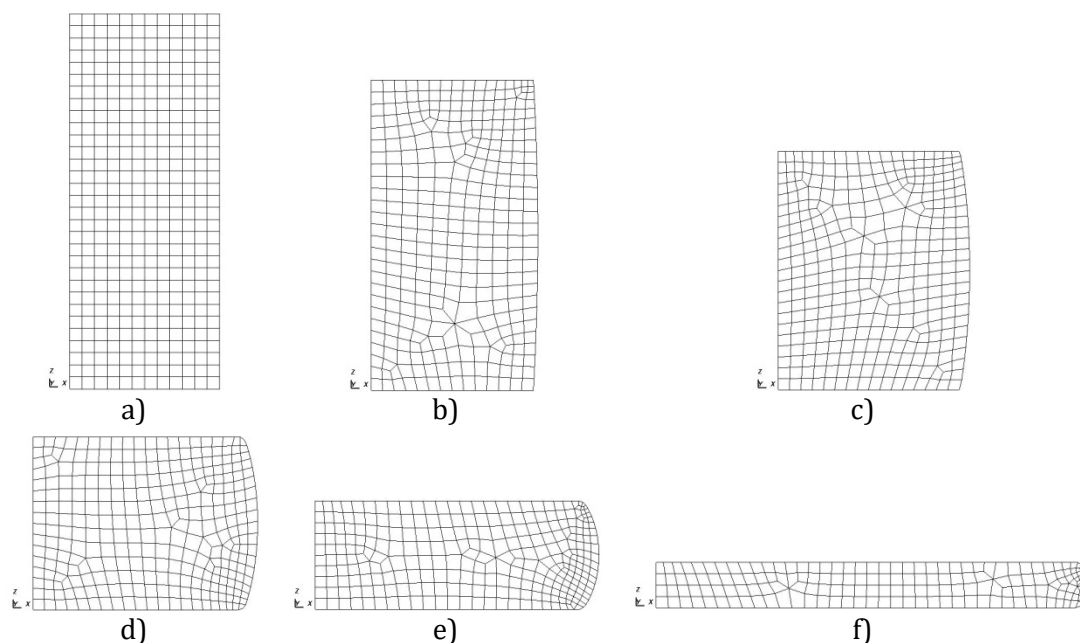
Osnovu za analizu zadate konstrukcije predstavlja poddomen, odnosno domen koji se zove konačni element. Konačni element nije diferencijalno malih dimenzija nego ima konačne dimenzije. Zbog toga su jednačine koje opisuju stanje u pojedinim konačnim elementima algebarske i pomoću njih se opisuje stanje konstrukcije u celini. To znači da se razmatrani domen koji ima beskonačan broj stepeni slobode može podeliti na određeni broj konačnih elemenata s konačnim brojem stepeni slobode. Svaki konačni element se karakteriše oblikom elementa, brojem i vrstom čvorova, brojem i vrstom nepoznatih u pojedinim čvorovima i vrstom interpolacionih funkcija. Bez bilo kog od ovih podataka element nije potpuno definisan. Postoji više vrsta konačnih elemenata, a vizuelni prikaz vrsta je prikazan na slici 6.3.



Slika 6.3 Vrste konačnih elemenata a) jednodimenzionalni elementi – linijski, b) dvodimenzionalni elementi – ravanski, c) trodimenzionalni elementi – zapreminski [77]

6.2.3. GENERISANJE MREŽE KONAČNIH ELEMENATA

Prilikom obrade materijala deformisanjem obradak se podvrgava velikim plastičnim deformacijama i relativno pomeranje između deformisanog materijala i površine alata je značajno. Kada se takvi procesi simuliraju, iako je početna mreža dobro generisana, često u pojedinim zonama dolazi do prevelike iskrivljenosti elemenata. Zbog toga je neophodno generisati novu mrežu, kako bi se proces simulacije nastavio. Proces generisanja nove mreže se zove premrežavanje i programski paketi namenjeni numeričkoj simulaciji uglavnom imaju module za automatsko premrežavanje [41].



Slika 6.4 Prikaz automatskog pemrežavanja u 2D simulaciji slobodnog sabijanja valjka ravnim alatima

Gustina mreže treba da se prilagodi složenosti geometrijskih detalja obratka i alata u svim koracima simulacije. Da bi se maksimizirala geometrijska prilagodljivost gustine mreže, treba uzeti u obzir granične konture alata i lokalnu debljinu obradaka. Za dobijanje finalne, potrebne gustine mreže, korisnik mora da izabere maksimalan broj elemenata dovoljan da se simulacija izvede do kraja sa zahtevanom preciznošću. Preterano veliki broj elemenata usporava simulaciju, zahteva veće mogućnosti računarskog procesora i moćniji hardver, posebno u slučaju 3D simulacija, ali daje preciznije rezultate. Na slici 6.4 prikazano je automatsko premrežavanje u 2D

simulaciji procesa slobodnog sabijanja valjka ravnim alatima. Na osnovu slike 6.4 može se zaključiti da se veličina elemenata menja neravnomerno po čitavom preseku. Takođe, na samom kraju procesa, dolazi do znatnog usitnjavanja konačnih elemenata u oblastima u kojima se javlja najveća deformacija istih. U ovom konkretnom slučaju, podešeno je automatsko premrežavanje onog trenutka kada se ugao između linija koje čine jednu čvornu tačku promeni za 10 stepeni ili kada deformacija elementa dostigne vrednost 0,1. Koji god se od ta dva uslova prvi ispuni dolazi do automatskog premrežavanja [41].

6.2.4. KONTAKTNO TRENJE

Kontaktno trenje predstavlja najvažniji segment kontaktnih uslova i u procesima deformisanja usled visokog pritiska igra veoma značajnu ulogu. U zavisnosti od kvaliteta unetih podataka simulacija će dati manje ili više tačne rezultate, što je u slučaju ispitivanja deformabilnosti veoma značajno. U programskom paketu Simufact.Forming je definisanje trenja moguće automatski i manuelno. Prilikom automatskog definisanja kontaktnog trenja moguće je prema određenoj skali izabrati uslove podmazivanja od loših pa sve do dobrih. U zavisnosti od izabranih uslova zavisice i koeficijent trenja na kontaktnim površinama. S druge strane, trenje je moguće definisati i manuelno. Pri manuelnom definisanju trenja moguće je birati između četiri tipa trenja:

- Columb
- Shear
- Kombinovano trenje
- IFUM

Columb tip trenja se zadaje preko vrednosti koeficijenta trenja μ ($0 < \mu < 0,5$) koja može biti konstantna ili promenljiva u toku procesa. Kontaktno trenje Shear se zadaje preko faktora trenja m ($0 < m < 1$). Kombinovano trenje zapravo predstavlja kombinaciju Columb i Shear uslova trenja. IFUM tip trenja se zadaje kada se simuliraju procesi polutoplog ili toplog kovanja u zatvorenom kalupu.

6.2.5. IZBOR MATERIJALA

U analizi procesa obrade metodom konačnih elemenata potrebno je matematički opisati plastično tečenje materijala. Postoje dve formulacije, koje se koriste za opisivanje ponašanja materijala pri deformisanju. Jedan model je strukturna formulacija (koristi se kod hladne obrade) preko analize deformisanja čvrstog tela, a drugi model je formulacija tečenja, sličan konceptu mehanike fluida [41].

Materijal mora biti pridružen svim elementima sistema koji su modelovani kao deformabilni (elastično ili plastično). Jedna od mogućnosti prilikom definisanja materijala jeste da se materijal definiše kao kruto plastičan ili elastoplastičan. Ulazne veličine (početni podaci o materijalu) su retko kad tačne jer su često dobijene eksperimentalnim putem ili na osnovu procene. Pošto je nekad teško potpuno definisati osobine materijala (npr. prethodno deformaciono stanje, čistoća mikrostrukture, nehomogenosti osobina koje zavise od proizvodnog procesa (anizotropija kod lima)) vrši se određena aproksimacija, pa od same tačnosti podataka o materijalu zavisi i tačnost

dobijenih rezultata. Osim toga, i sami numerički procesi indukuju greške različitih tipova (na primer greške zaokruživanja) [41].

6.3 NUMERIČKA ANALIZA SABIJANJA MONOTONIH MODELA DEFORMISANJA

U ovom radu je pored eksperimentalne analize monotonih procesa deformisanja sprovedena i numerička analiza. U tu svrhu je korišćen programski paket za simulaciju procesa plastičnog deformisanja Simufact.Forming V13. Primena numeričke analize u ovoj disertaciji ima za cilj proveru njene primenljivosti na oblast deformabilnosti materijala. Nažalost, primenom simulacija prikazanih u ovoj disertaciji nije moguće odrediti trenutak pojave oštećenja uzoraka. Cilj primene simulacije je praćenje istorije deformisanja u dva međusobno upravna pravca. Hod alata definisan u simulaciji je bio identičan hodu alata u eksperimentu (za svaki model). Na osnovu očitanih vrednosti deformacija primenom metodologije prikazane u poglavlju 4 određena je promena β faktora za sve modele deformisanja koji su prikazani u eksperimentalnom delu rada. Nakon toga, izračunate su vrednosti granične efektivne deformacije φ_{e^g} i srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja β_{sr} , unete su na dijagram granične deformabilnosti i upoređene s eksperimentalnim vrednostima.

Procesi deformisanja istraživani u okviru ove disertacije (sabijanje uzoraka različitih geometrijskih oblika ravnim i konusnim alatima) simulirani su u programskom paketu Simufact.Forming V13 koji predstavlja paletu programa razvijenih na modularnom principu namenjenih za simulaciju i optimizaciju procesa u okviru tehnologija deformisanja i spajanja, metalurške analize materijala uključujući i fazne transformacije kao i za upravljanje projektnom dokumentacijom. Primenom ovog softvera je smanjen broj neuspešnih industrijskih projekata širom sveta za 50% [75].

Simufact.Forming programski paket je rezultat unapređenja i objedinjavanja dugo razvijanih komplementarnih softverskih rešenja za simulacije procesa deformisanja MSC. SuperForm-a i MSC.SuperForge-a, baziranih na MSC.Dytran i MSC.Marc solverima. Program se može koristiti za 2D i 3D simulacije različitih procesa oblikovanja u hladnom i toplom stanju (kovanje, sabijanje, istosmerno i suprotnosmerno istiskivanje, valjanje, savijanje i dr), primenom integrisanih MKE i MKZ tehnika modelovanja.

Moćan postprocesor za vizuelizaciju rezultata simulacije (vrednosti, slike i animacije), omogućava projektantima i inženjerima potpun uvid u sve aspekte procesa, uključujući:

- Utvrđivanje deformacionog i naponskog stanja u radnom komadu,
- Sliku tečenja materijala s prikazom celog modela kao i modela u željenim presecima,
- Popunjavanje alata i markiranje vankontaktne zone,
- Habanje alata i procenu kriterijuma loma,
- Procenu sile na alatima,
- Procenu naponskog stanja na alatima u toku procesa.

Takođe, softver dozvoljava paralelno procesiranje (proračun simulacije i analize procesa korišćenjem više procesora) čime se može značajno smanjiti CPU vreme. Kompletna prezentacija

procesa koji se simulira, odnosno unos ulaznih podataka, korišćenjem kvalitetnog intuitivnog korisničkog interfejsa, može se izvesti relativno brzo, uključujući:

- uvoz CAD geometrije alata i priprema preko STL, DXF, Nastran i VRML formata,
- izbor korišćene mašine iz baze podataka o mašinama,
- izbor karakteristika materijala priprema i alata iz baze podataka,
- definisanje uslova kontaktnog trenja, izbor modela i numeričke vrednosti trenja,
- definisanje temperaturnih režima procesa za generisanje i transfer toplote,
- automatsko/ručno pozicioniranje priprema u alatu,
- izbor parametara MKE/MKZ analize uključujući i remeshing.

Pre samog kretanja u proces podešavanja simulacije neophodno je izabrati vrstu simulacije (2D ili 3D). U ovoj disertaciji su, s obzirom na geometriju uzoraka, korišćene 2D simulacije što je podrazumevalo kreiranje modela na bazi konačnih elemenata (metoda konačnih zapremina se koristi isključivo pri 3D simulacijama).

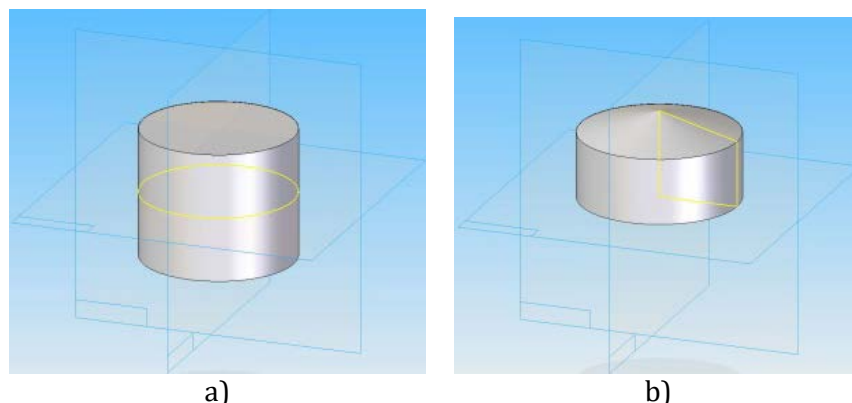
6.4 MODELOVANJE ALATA

Prilikom podešavanja simulacije prvi korak predstavlja modelovanje geometrije alata. Rad u Simufact.Forming-u zahteva kreiranje odgovarajućeg 3D modela alata bez obzira na to da li se radi o 2D ili 3D simulaciji. Alati jednostavne geometrije mogu biti konstruisani i direktno u samom programu, ali su mogućnosti ograničene. Na ovaj način moguće je definisati alate sledećih oblika:

- Alat kockastog oblika. Kod ovog načina definisanja alata zadaju se dimenzije stranica kocke u tri međusobno upravna pravca.
- Alat cilindričnog oblika. Prilikom definisanja alata cilindričnog oblika zadaju se poluprečnik i visina cilindra. Takođe je moguće definisati i radijus zaobljenja ivica alata. Nakon definisanja poluprečnika i visine potrebno je zadati i ugao koji za potrebe punog cilindričnog alata uvek iznosi 360°. Moguće je zadati i manji ugao, ali tada će alat biti u obliku cilindričnog isečka.
- Alat cevastog oblika. U slučaju definisanja cevastog alata zadaju se spoljašnji i unutrašnji radijus kao i visina. Kao i u slučaju cilindričnog alata potrebno je definisati ugao koji je 360°, ili može biti manji kada je potreban alat oblika cevastog isečka.
- Alat kockastog oblika sa zaobljenim ivicama. Kao i kod definisanja kockastog alata zadaju se visina, širina i dubina, ali za razliku od definisanja kockastog alata, kod ovog načina definisanja postoji mogućnost zadavanja radijusa po visini, širini ili dubini. Na ovaj način je moguće definisati kockasti alat sa zaobljenjima.

Drugi način definisanja alata je uvoženje (import) alata prethodno konstruisanog primenom nekog od CAD softvera. U ovoj disertaciji su alati konstruisani primenom Solid.Edge V18 programskog paketa. Nakon konstrukcije alati se moraju sačuvati u formatu *.STL* koji je prihvatljiv za Simufact.Forming softver. Nakon definisanja geometrije alata potrebno je definisati i njihova svojstva. U konkretnim simulacijama alati su definisani kao kruta nedeformabilna tela. Izgled

cilindričnog i konusnog alata konstruisanog u programskom paketu Solid.Edge su prikazani na slici 6.5. Dimenzije alata korišćenih u simulaciji su iste kao i dimenzije alata korišćenih u eksperimentu.



Slika 6.5 Izgled cilindričnog (a) i konusnog (b) alata konstruisanih u Solid.Edge-u

6.5 MODELOVANJE TRIBOLOŠKIH USLOVA

Tribološki uslovi na kontaktnim površinama alat-obradak kod svih procesa deformisanja definisani su preko Columb-ov modela trenja. U literaturi ne postoje jasno definisani kriterijumi za izbor odgovarajućeg modela trenja i uglavnom se mogu naći preporuke koje govore da koeficijent trenja μ treba koristiti kod simulacija procesa hladne obrade deformisanjem kod kojih su kontaktni pritisci nižeg intenziteta, dok se konstantni faktor smicanja „m“ primenjuje većinom kod tople obrade kao i hladne obrade gde se javljaju veliki kontaktni pritisci [6]. Vrednosti koeficijenta trenja su određene prema [30, 55] i iznosila je $\mu=0,12$ za uzorke grupe C_3D, C_L, C_Z i CO_KRA dok je koeficijent trenja za grupu uzoraka R_L iznosio $\mu=0$.

6.6 MODELOVANJE MATERIJALA UZORKA

Materijal obratka (C45E (Č 1531)) za sve grupe uzoraka je modelovan kao plastičan. Plastične karakteristike materijala (kriva-napon tečenja) date su u obliku Ludvik-ove krive koja je određena eksperimentalnim putem, jednačina 6.1.

$$K = 293,15 + 573,15 \cdot \varphi^{0,413} \quad (6.1)$$

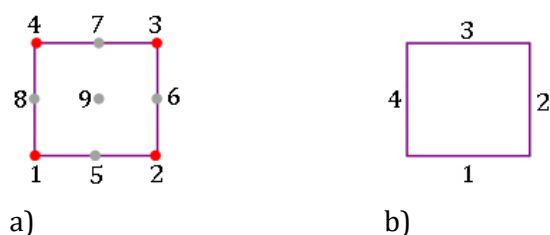
Pored krive tečenja potrebno je definisati parametre materijala koji su prikazani u tabeli 6.1. Svi parametri materijala su definisani kao konstantne vrednosti, mada, Simufact.Forming softver dozvoljava definisanje ovih parametara preko tabelarnih vrednosti, odnosno kao veličine koje se menjaju tokom vremena.

Tabela 6.1 Parametri materijala C45E

Young-ov modul elastičnosti [MPa]	Gustina materijala [kg/mm ³]	Poisson-ov koeficijent [-]
210 000	7,8·10 ⁻⁹	0,3

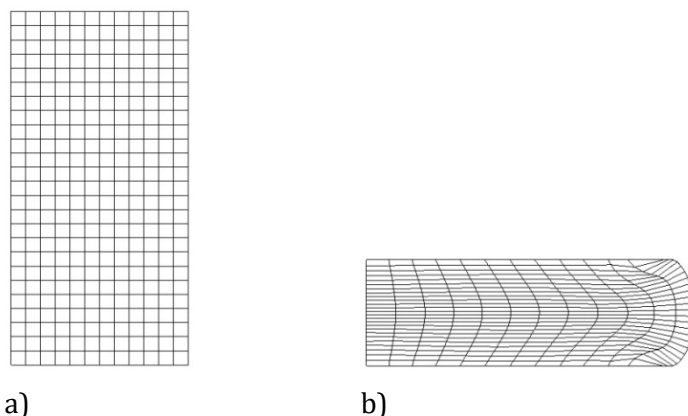
6.7 KREIRANJE MREŽE KONAČNIH ELEMENATA

Mreža konačnih elemenata za sve grupe uzoraka je kreirana u skladu s dva prethodno postavljena kriterijuma. Prvi kriterijum se odnosi na tačnost rezultata i teži ka definisanju što finije, odnosno sitnije mreže elemenata na modelima. Drugi kriterijum je vezan za vreme trajanja simulacije. Imajući u vidu raspoloživost računarske opreme i prethodna iskustva koja govore da suviše fina mreža konačnih elemenata dovodi do određenih problema tokom samog procesa simulacije veličina elemenata je iznosila od 0,2 do 0,4 mm, zavisno od grupe uzoraka. Izbor vrste i tipa konačnog elementa je za sve grupe uzoraka bio isti. Za simulacije procesa deformisanja koristili su se konačni elementi vrste *Advancing Front Quad* dok je tip elementa bio *Quads (9)*, slika 6.6. Kod ovog tipa elemenata postoji 9 čvornih tačaka, slika 6.6a, odnosno 4 stranice, slika 6.6b. Broj konačnih elemenata je zavisio od grupe uzoraka.



Slika 6.6 Izgled elementa tipa *Quads (9)*

Potrebno je naglasiti da usvojeni tip mesher-a za modelovanje uzoraka ne vrši premrežavanje u toku procesa deformisanja, tj. nema obnavljanja mreže. Gustina mreže se ne manja, već se prati deformacija jednog elementa. To se može videti na primeru početne i krajnje pozicije u simulaciji jednog uzorka, slika 6.13. Slika 6.7a predstavlja početni položaj uzorka u simulaciji i moguće je zaključiti da su svi elementi jednaki. Nakon procesa deformisanja dolazi do promene oblika elemenata (slika 6.7b), ali nema promene gustine elemenata. Na taj način moguće je pratiti deformaciju jednog elementa, što je u ovoj disertaciji i rađeno.



Slika 6.7 Primer sabijanja cilindra bez premrežavanja

Simufact.Forming omogućava definisanje koraka za beleženje rezultata na bazi više kriterijuma: vremenskog, procentualnog ili ostvarenog hoda u procesu. Radi uštede u vremenu proračuna, rezultati simulacije su beleženi za unapred zadate vrednosti hoda, koje su bile definisane u skladu s eksperimentalnim vrednostima hodova.

6.8 MODELOVANJE MAŠINE I USLOVA OBRADE

Za modelovanje mašine korišćen je princip koji podrazumeva formiranje zajedničkog modela mašine i procesa deformisanja. U okviru ovog modela se koristi uprošćeni model mašine, odnosno, mašina se zamenjuje adekvatnim modelom u vidu jedne ili više elastičnih opruga odnosno prigušnih elemenata. Karakteristike realne mašine najčešće se opisuju pomoću linerano-elastičnog modela, dok se kod nekih softvera, uz određena ograničenja, može primeniti kombinovani linearno-nelinearni model [57]. Glavna prednost integrisanja modela mašine u model procesa deformisanja je velika numerička stabilnost i preciznije (pouzdanije) definisanje kontaktnih uslova i procesa deformisanja. Na ovaj način se povećava tačnost simulacije uz istovremeno skraćanje vremena trajanja simulacije.

Prvi korak prilikom modelovanja konkretne prese predstavlja izbor tipa prese. U ovom konkretnom slučaju izabrana je hidraulična presa iz baze podataka u okviru Simufact.Forming softvera. Nakon toga, definisana je brzina pritiskivača prese. Usvojena vrednost brzine pritiskivača je iznosila 0,1mm/s i bila je identična eksperimentalnim vrednostima.

6.9 REZULTATI NUMERIČKE ANALIZE

Numerička analiza ispitivanih modela deformisanja je izvedena u programskom paketu Simufact.FormingV13, prema postavkama prikazanim u prethodnim poglavljima. Uzimajući u obzir metodologiju istraživanja, odnosno način određivanja pokazatelja naponskog stanja i efektivne deformacije, numerička analiza je usmerena na određivanje glavnih deformacija φ_z i φ_θ kao i napona σ_z i σ_θ . S obzirom na to da je pokazatelj naponskog stanja određen i na osnovu direktnog očitavanja vrednosti napona iz simulacije, u ovom poglavlju prikazani su i efektivni naponi i deformacije za ispitivane modele deformisanja.

Oblici i dimenzije uzoraka analiziranih simulacijama su identični onima korišćenim u eksperimentu (tabela 4.3).

6.9.1 NUMERIČKA ANALIZA SABIJANJA UZORAKA GRUPE R_L RAVNIM ALATIMA

Deformaciono stanje modela deformisanja R_L u pravcu kretanja alata (φ_z) je prikazano na slici 6.8. Kao što se može videti na slici 6.8, rezultati simulacije su predstavljeni u 6 faza, što u potpunosti odgovara fazama deformisanja ostvarenim prilikom eksperimentalne analize. Za svaku fazu je dat prikaz ostvarene deformacije na lateralnoj površini na istoj poziciji kao i kod eksperimentalnih istraživanja.

Na slici 6.9 dat je prikaz deformacionog stanja modela deformisanja R_L u pravcu normalnom na pravac kretanja alata φ_θ . Faze deformisanja prikazane na slici 6.9 u potpunosti odgovaraju fazama ostvarenim u eksperimentu.

Efektivna deformacija po fazama za grupu uzoraka R_L je prikazana na slici 6.10.

Pored deformacionog stanja za određivanje istorije deformisanja važno je poznavati i naponsko stanje u toku deformisanja. Na slici 6.11 je dat prikaz naponskog stanja u pravcu kretanja alata σ_z dok je naponsko stanje u tangencijalnom pravcu σ_θ prikazano na slici 6.12.

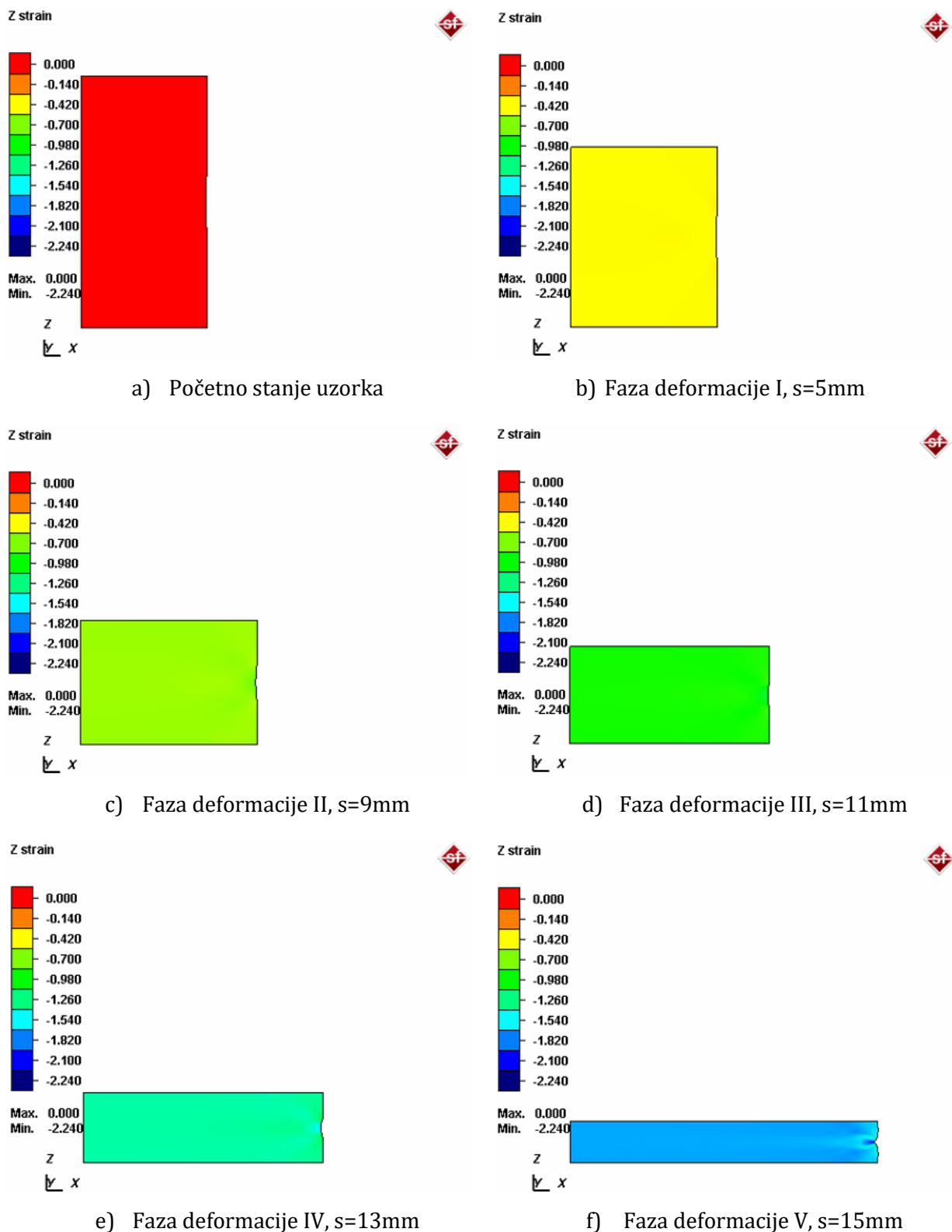
Posmatranjem slika 6.8 i 6.9 zaključuje se da su maksimalne deformacije ostvarene pri hodu od 15mm. Ostvarena deformacija u z pravcu je dostigla vrednost od -2,08 dok je u tangencijalnom pravcu ta vrednost 0,883. S druge strane, pri istom hodu napon u pravcu z ose je dostigao vrednost od -1317MPa dok je u tangencijalnom pravcu vrednost napona dostigla -270MPa.

Na slici 6.13 dat je prikaz efektivnog napona po fazama za grupu uzoraka R_L.

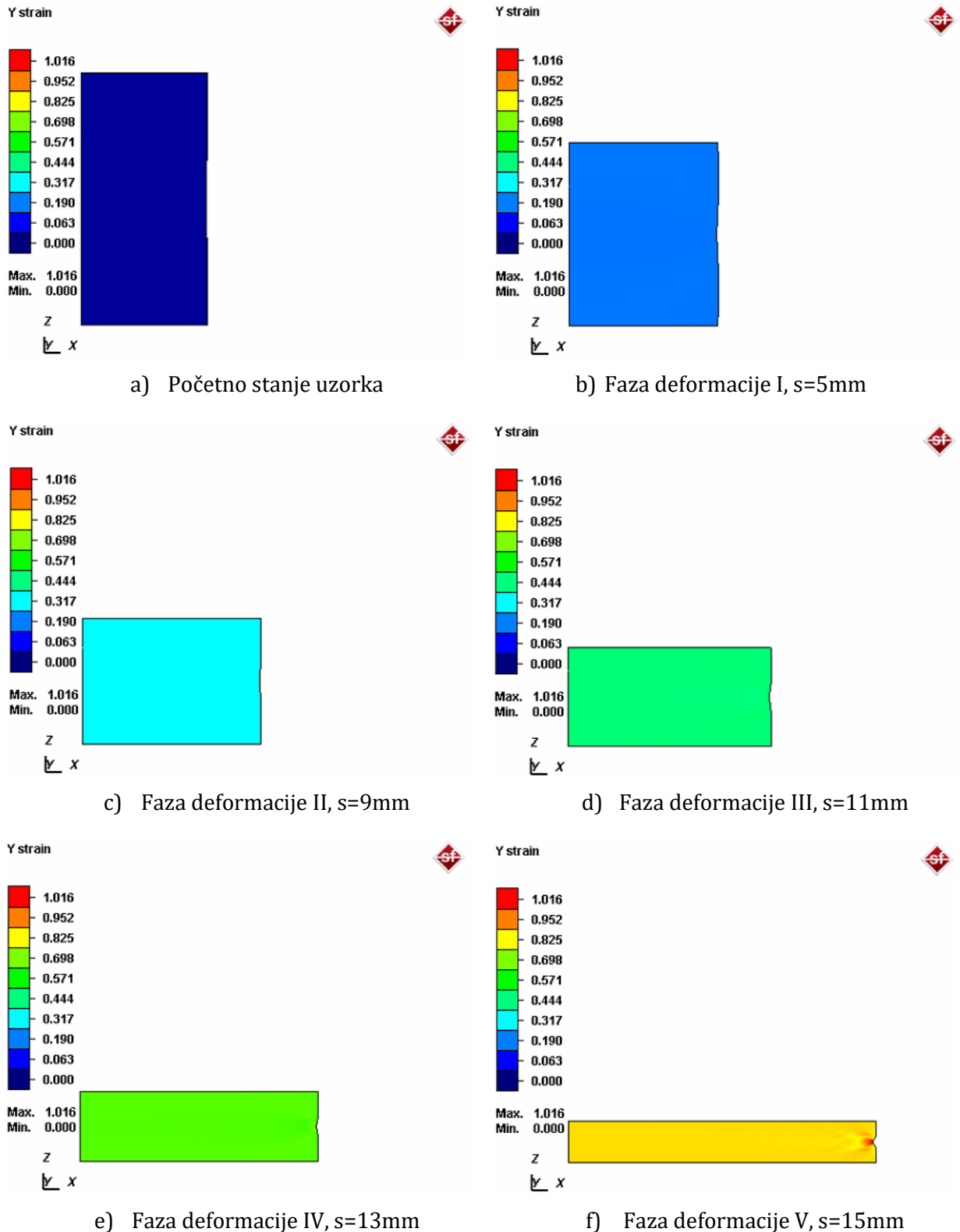
Vrednosti napona i deformacija grupe uzoraka R_L ostvarenih u simulaciji su dati u tabeli 6.2. Pokazatelj naponskog stanja β izračunat na osnovu deformacionog koncepta kao i pokazatelj naponskog stanja β_{NS} izračunat na osnovu naponskog koncepta su prikazani u tabeli 6.2 (proračun izvršen na osnovu metodologije prikazane u poglavlju 4.3).

Tabela 6.2 Vrednosti deformacija, napona i pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka R_L

Br.	φ_z	φ_θ	φ_e	β	σ_z	σ_θ	σ_e	β_{NS}
0	0,000	0,000	0,000	-1,131	0,000	0,000	0,000	-1,071
1	-0,382	0,160	0,381	-1,129	-677	-40	655	-1,095
2	-0,853	0,360	0,853	-1,121	-840	-83	793	-1,164
3	-1,200	0,502	1,206	-1,151	-947	-113	871	-1,217
4	-1,610	0,668	1,608	-1,109	-1078	-178	964	-1,303
5	-2,080	0,883	2,088	-1,104	-1317	-270	1038	-1,529

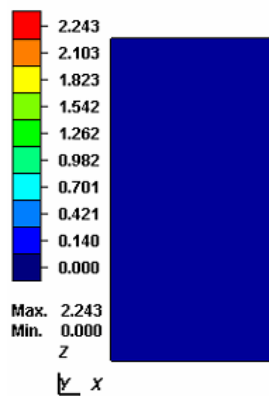


Slika 6.8 Deformaciono stanje za model R_L u pravcu kretanja alata – radijus 60mm



Slika 6.9 Deformaciono stanje za model R_L u tangencijalnom pravcu – radijus 60mm

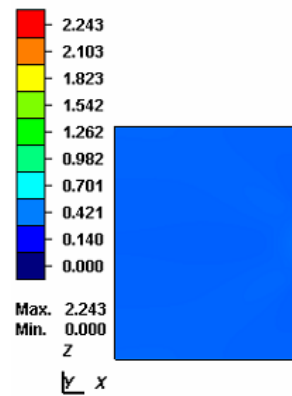
Effective plastic strain



a) Početno stanje uzorka



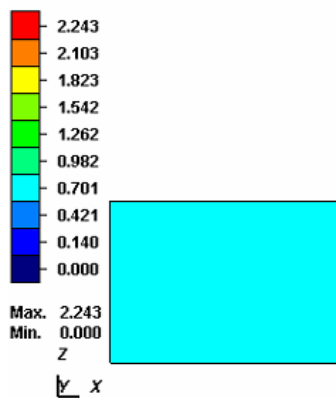
Effective plastic strain



b) Faza deformacije I, s=5mm



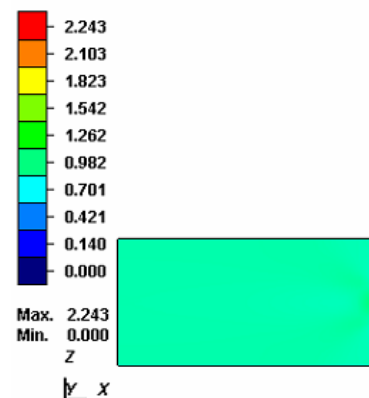
Effective plastic strain



c) Faza deformacije II, s=9mm



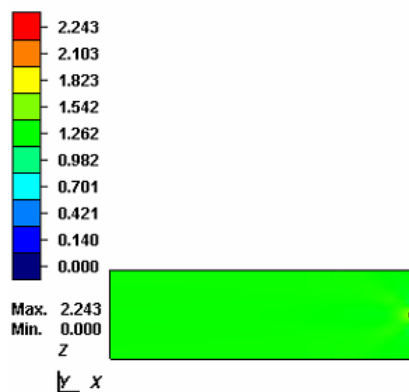
Effective plastic strain



d) Faza deformacije III, s=11mm



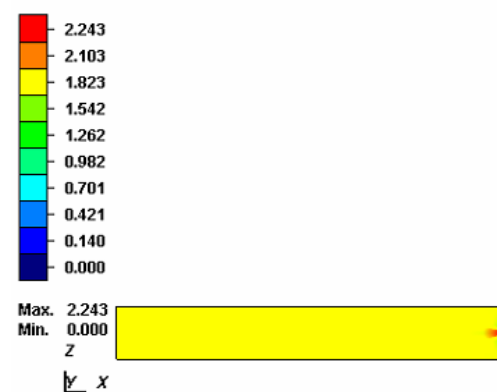
Effective plastic strain



e) Faza deformacije IV, s=13mm



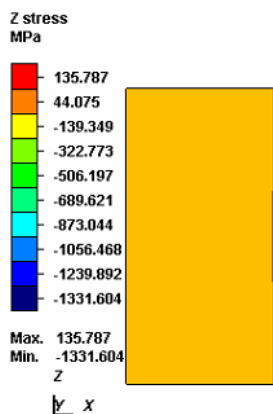
Effective plastic strain



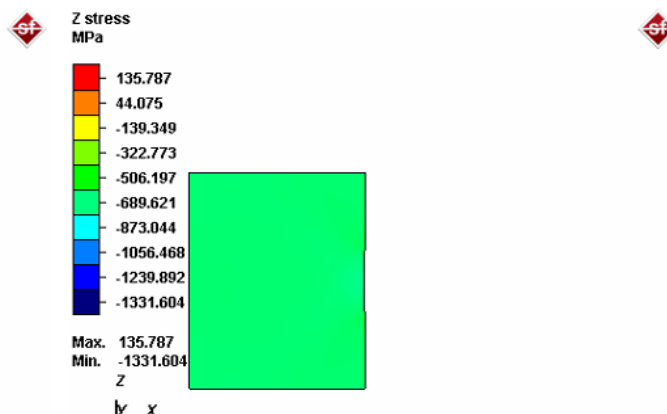
f) Faza deformacije V, s=15mm



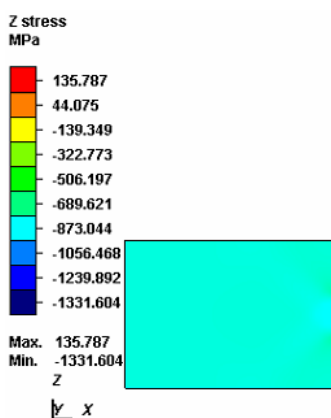
Slika 6.10 Efektivna deformacija za grupu uzoraka R_L – radijus 60mm



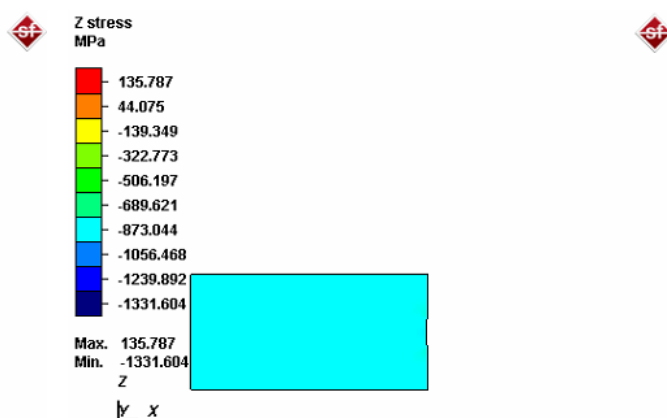
a) Početno stanje uzorka



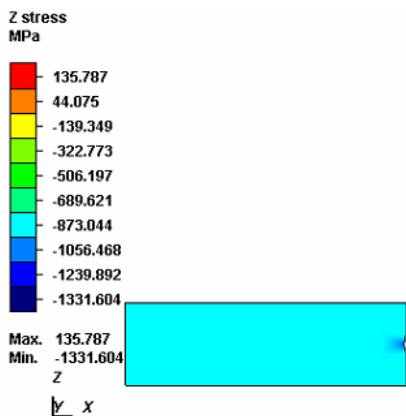
b) Faza deformacije I, s=5mm



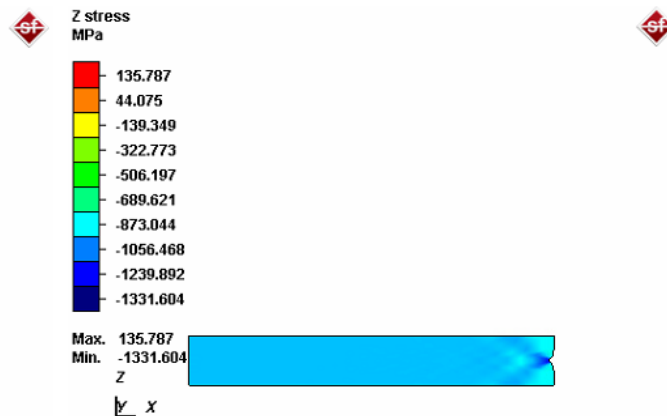
c) Faza deformacije II, s=9mm



d) Faza deformacije III, s=11mm

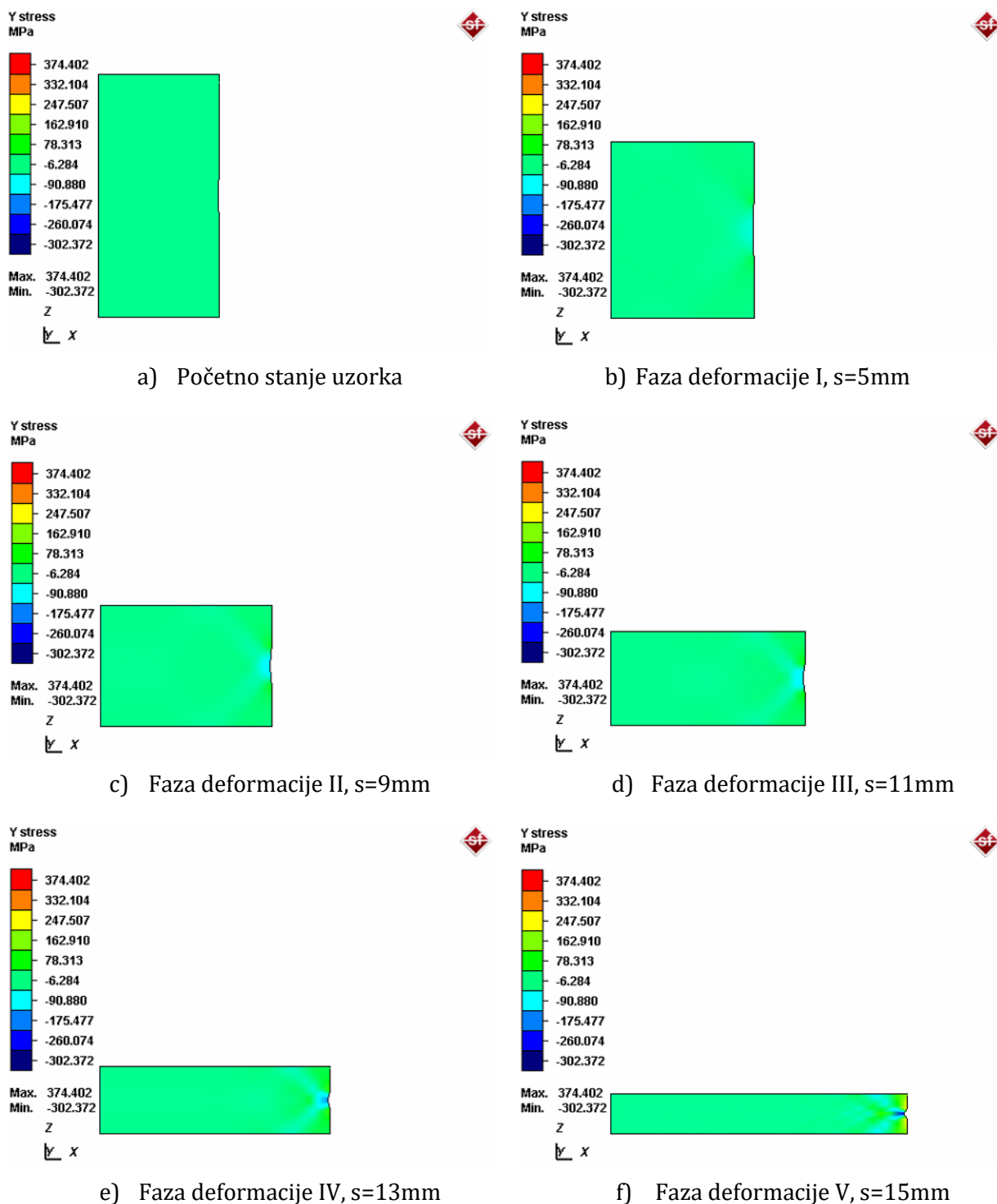


e) Faza deformacije IV, s=13mm

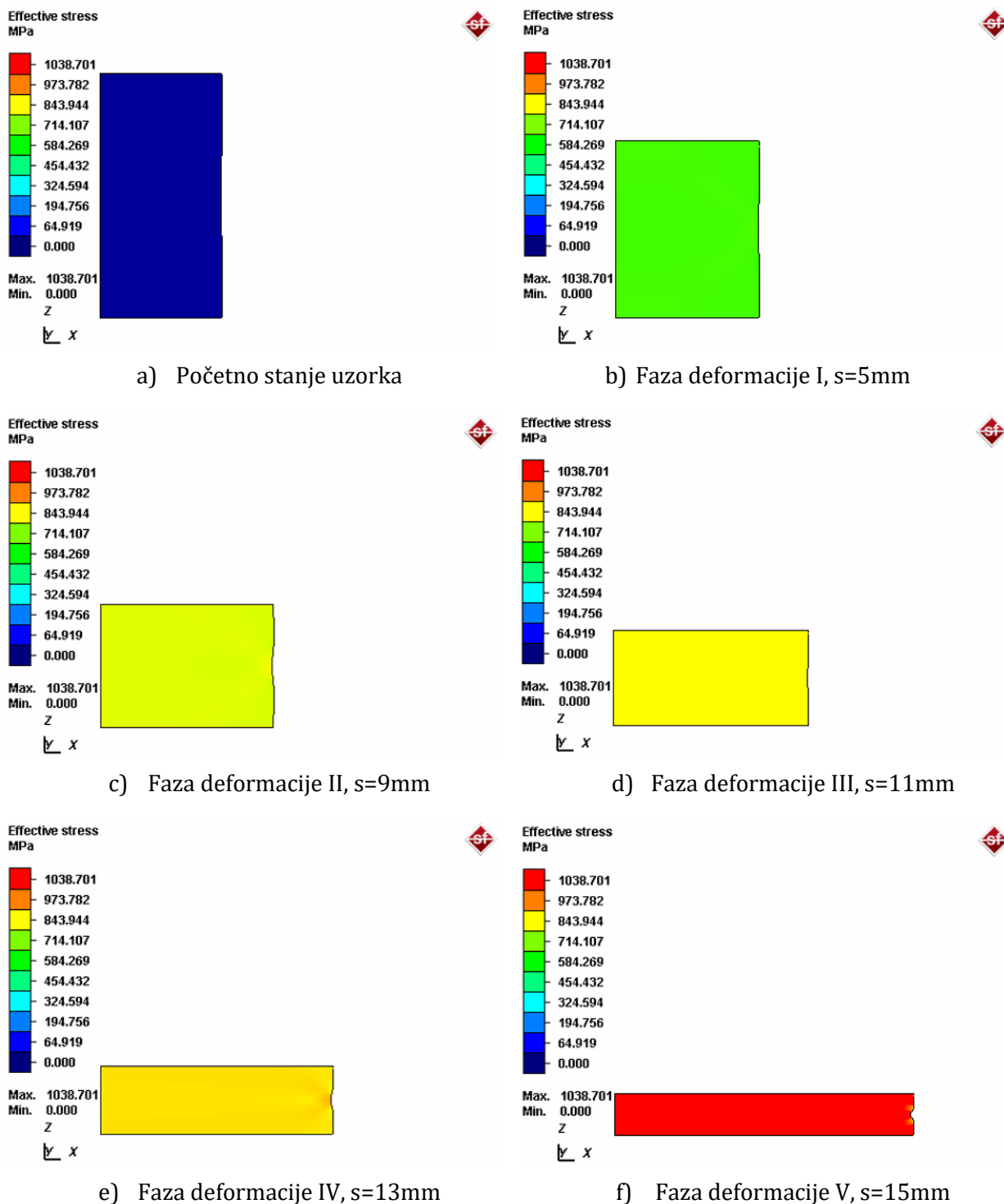


f) Faza deformacije V, s=15mm

Slika 6.11 Naponsko stanje u pravcu kretanja alata σ_z za grupu uzoraka R_L – radijus 60mm



Slika 6.12 Naponsko stanje u tangencijalnom pravcu σ_{θ} za grupu uzoraka R_L – radijus 60mm



Slika 6.13 Raspored efektivnih napona za grupu uzoraka R_L – radijus 60mm

6.9.2 NUMERIČKA ANALIZA SABIJANJA UZORAKA GRUPE C_L RAVNIM ALATIMA

Deformaciono stanje modela deformisanja C_L u pravcu kretanja alata (φ_z) je prikazano na slici 6.14. Rezultati simulacije su predstavljeni u 6 faza, što u potpunosti odgovara fazama deformisanja ostvarenim prilikom eksperimentalne analize. Za svaku fazu je dat prikaz ostvarene deformacije na slobodnoj površini na istoj poziciji kao i kod eksperimentalnih istraživanja.

Na slici 6.15 dat je prikaz deformacionog stanja modela deformisanja C_L u tangencijalnom pravcu φ_θ . Faze deformisanja prikazane na slici 6.15 u potpunosti odgovaraju fazama ostvarenim u eksperimentu.

Efektivna deformacija za grupu uzoraka C_L po fazama prikazana je na slici 6.16.

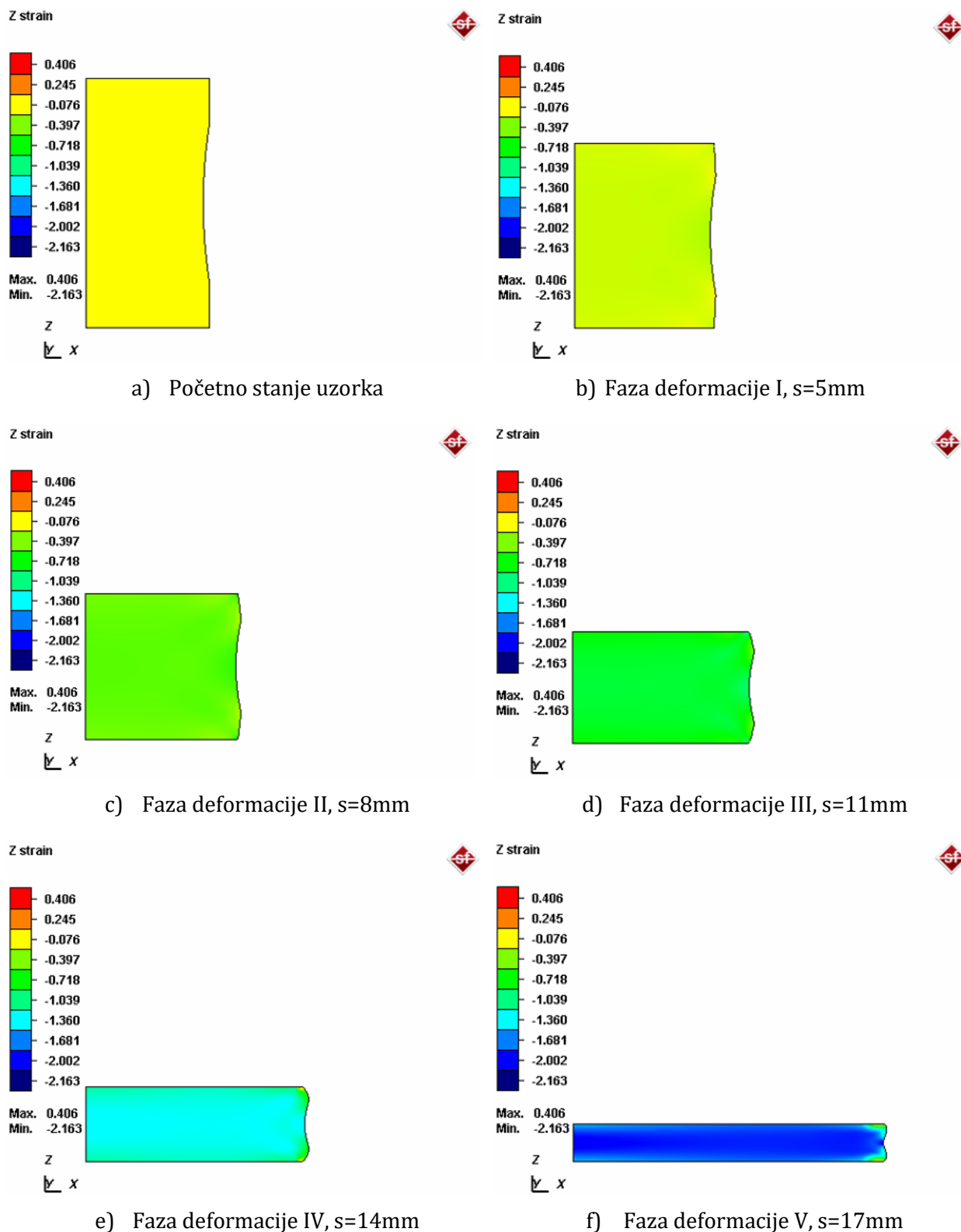
Naponsko stanje u dva pravca (z i θ) je prikazano na slikama 6.17 i 6.18. U oba slučaja su prikazana naponska stanja za 6 faza deformisanja, kao što je slučaj kod deformacionog stanja.

Posmatranjem slika 6.14 i 6.15 zaključuje se da su maksimalne deformacije ostvarene pri hodu od 17mm. Ostvarena deformacija u z pravcu je dostigla vrednost od -1,9 dok je u tangencijalnom pravcu ta vrednost 0,903. Pri istom hodu napon u pravcu z ose je dostigao vrednost od -1237MPa dok je u tangencijalnom pravcu vrednost napona dostigla -237MPa.

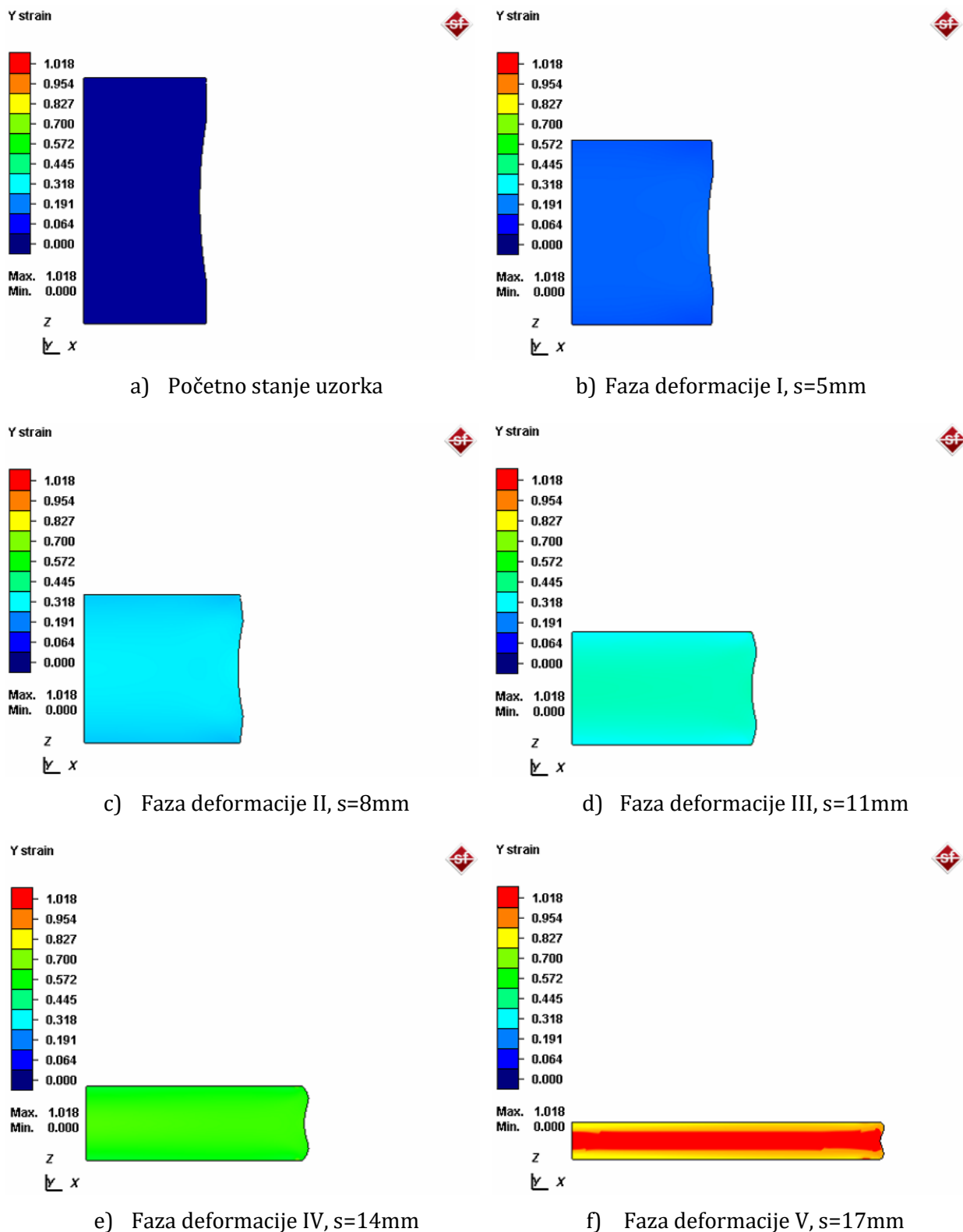
Efektivni naponi za grupu uzoraka C_L po fazama su prikazani na slici 6.19. Vrednosti napona i deformacija grupe uzoraka C_L ostvarenih u simulaciji su dati u tabeli 6.3. Pokazatelj naponskog stanja β izračunat na osnovu deformacionog koncepta kao i pokazatelj naponskog stanja β_{NS} izračunat na osnovu naponskog koncepta su prikazani u tabeli 6.3 (proračun izvršen na osnovu metodologije prikazane u poglavlju 4.3).

Tabela 6.3 Vrednosti deformacija, napona i pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka C_L

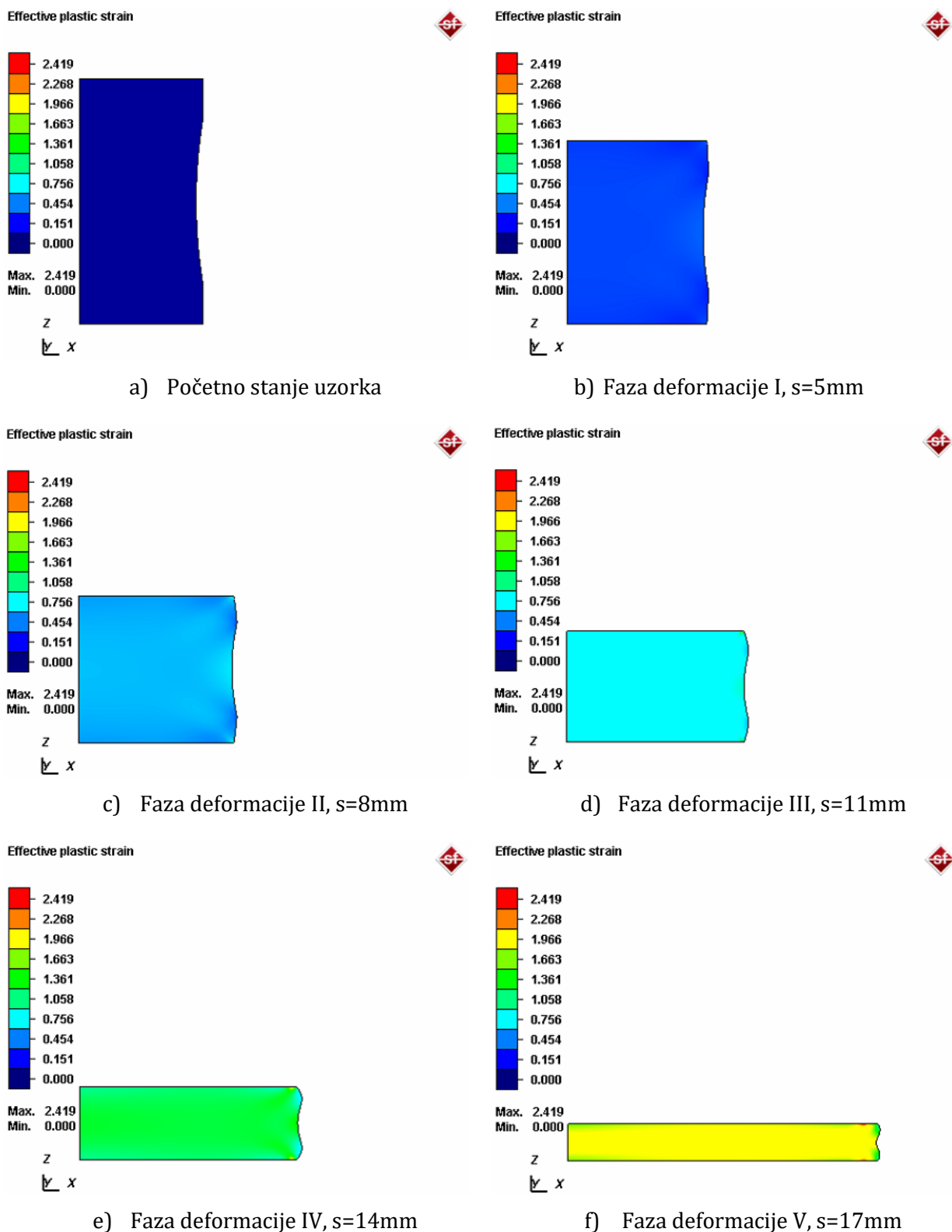
Br.	φ_z	φ_θ	φ_e	β	σ_z	σ_θ	σ_e	β_{NS}
0	0,000	0,000	0,000	-1,101	0,000	0,000	0,000	-1,098
1	-0,349	0,160	0,349	-1,084	-679	-57	652	-1,129
2	-0,611	0,283	0,612	-1,069	-783	-63	749	-1,130
3	-0,948	0,435	0,949	-1,052	-868	-71	839	-1,119
4	-1,391	0,646	1,392	-1,028	-944	-111	934	-1,130
5	-1,900	0,903	1,901	-0,998	-1237	-237	1057	-1,395



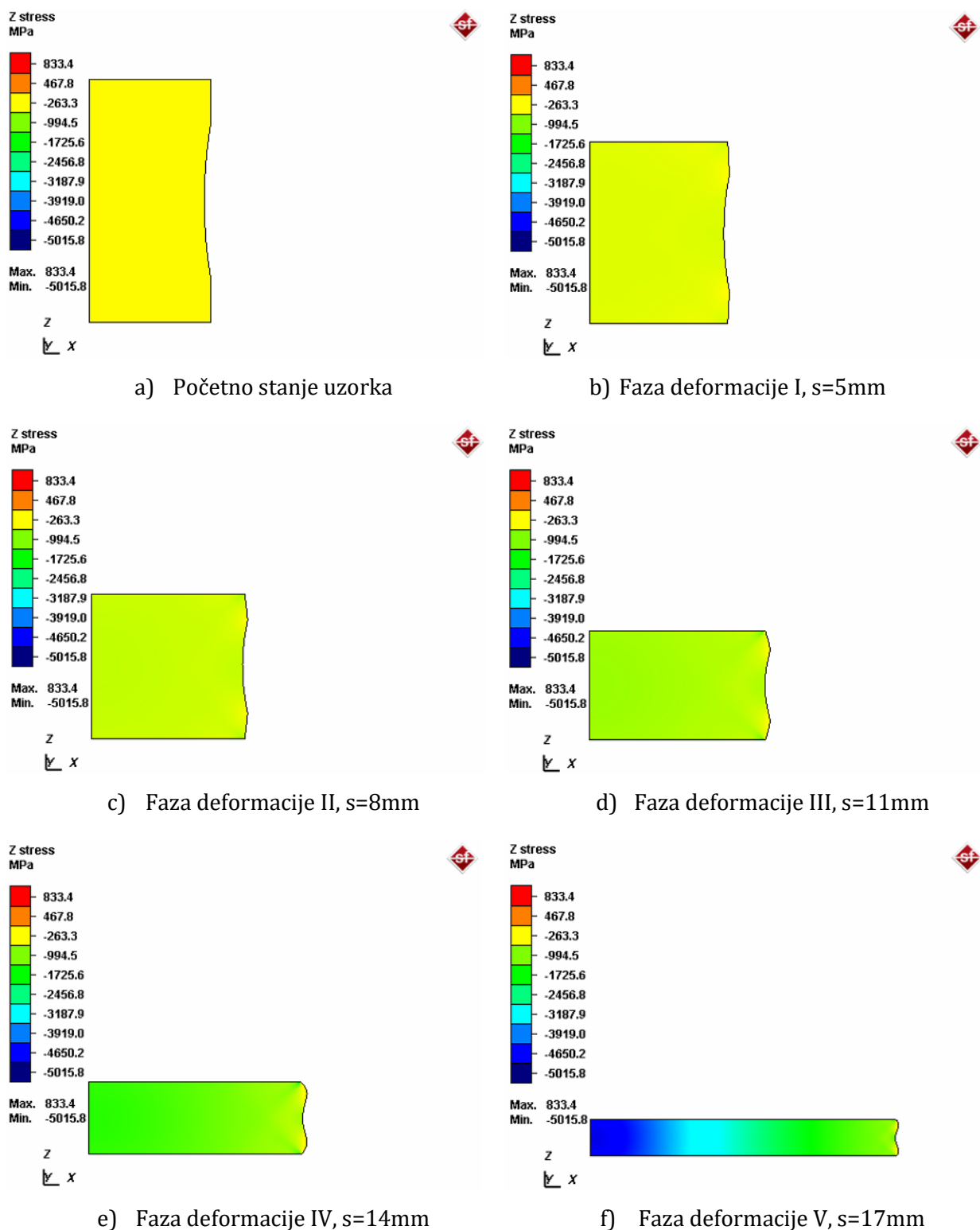
Slika 6.14 Deformaciono stanje u pravcu kretanja alata ϕ_z za grupu uzoraka C_L



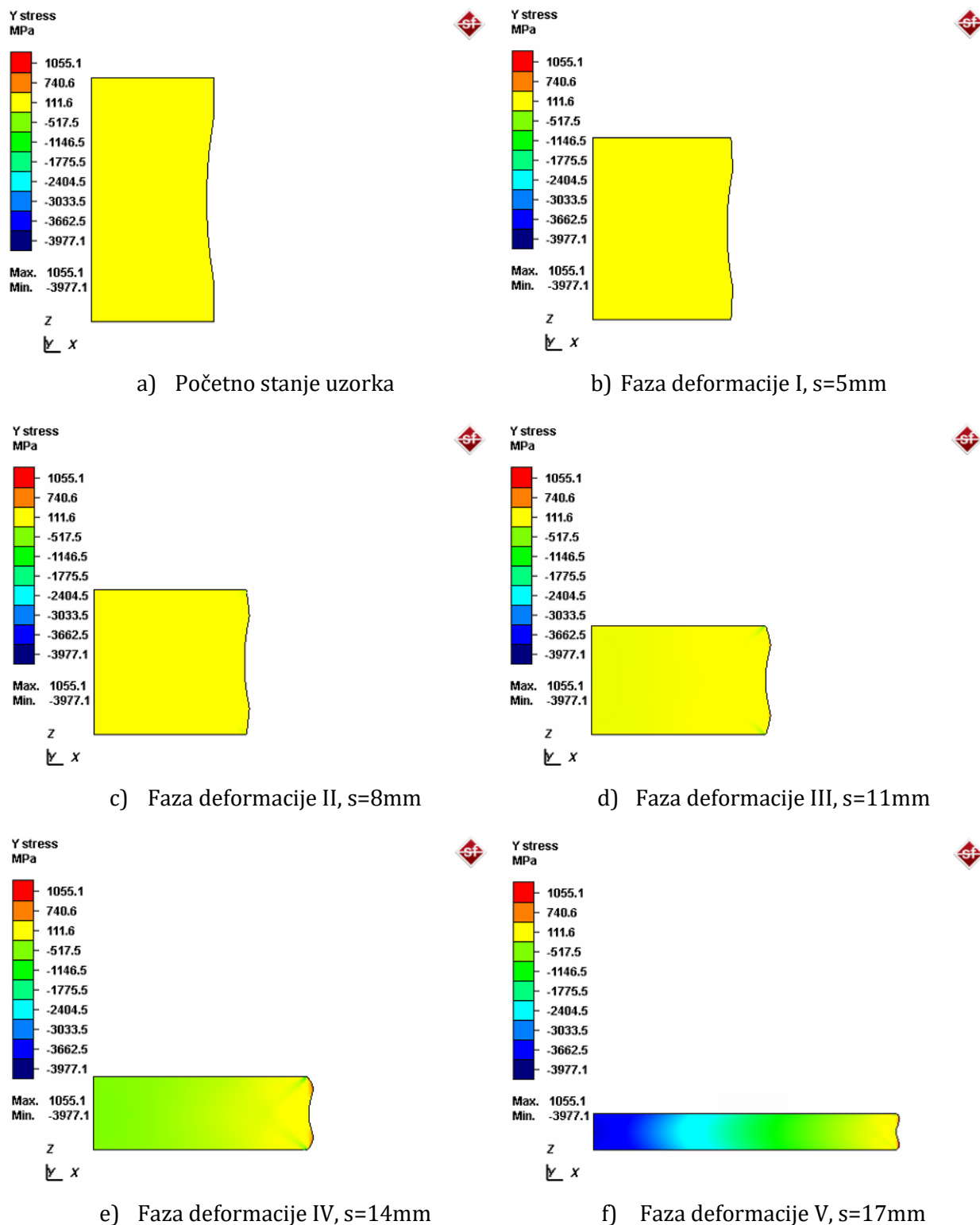
Slika 6.15 Deformaciono stanje u tangencijalnom pravcu φ_θ za grupu uzoraka C_L



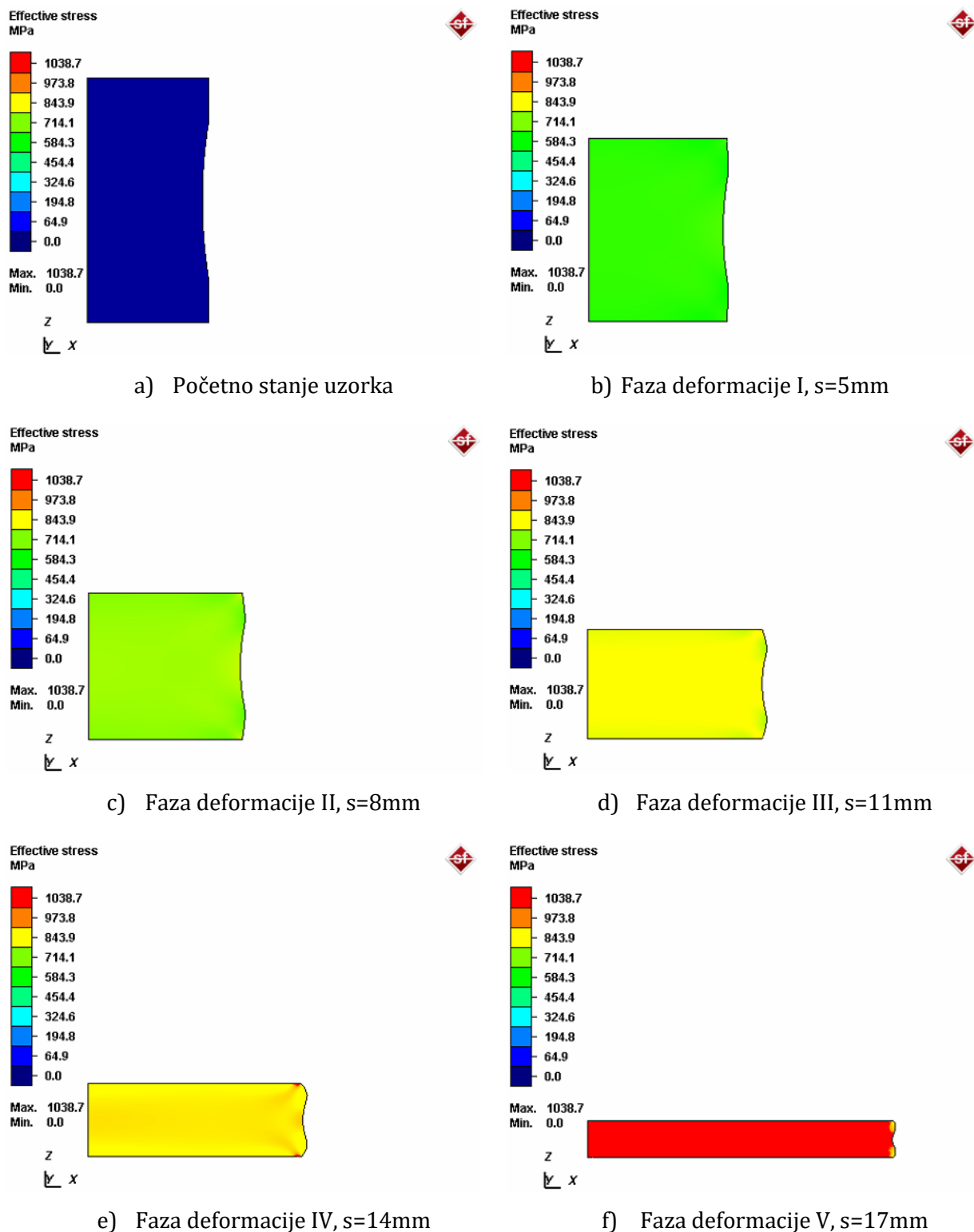
Slika 6.16 Efektivna deformacija za grupu uzoraka C_L



Slika 6.17 Naponsko stanje u pravcu kretanja alata σ_z za grupu uzoraka C_L



Slika 6.18 Naponsko stanje u tangencijalnom pravcu σ_{θ} za grupu uzoraka C_L



Slika 6.19 Efektivni napon za grupu uzoraka C_L

6.9.3 NUMERIČKA ANALIZA SABIJANJA UZORAKA GRUPE C_Z RAVNIM ALATIMA

Model deformisanja C_Z se suštinski razlikuje od ostalih modela deformisanja, s obzirom na to da ovaj model nije osno-simetričan. Deformaciono stanje modela deformisanja C_Z u pravcu kretanja alata (φ_z) je prikazano na slici 6.20. Kao što se može videti na slici 6.20, rezultati simulacije su predstavljeni u 6 faza, što u potpunosti odgovara fazama deformisanja ostvarenim prilikom eksperimentalne analize. Za svaku fazu je dat prikaz ostvarene deformacije na slobodnoj površini na istoj poziciji kao i kod eksperimentalnih istraživanja.

Na slici 6.21 dat je prikaz deformacionog stanja modela deformisanja C_Z u tangencijalnom pravcu φ_x . Faze deformisanja prikazane na slici 6.21 u potpunosti odgovaraju fazama ostvarenim u eksperimentu. Efektivna deformacija po fazama je prikazana na slici 6.22.

Na slici 6.23 dat je prikaz efektivnih napona po fazama za ovu grupu uzoraka.

Pored deformacionog stanja za određivanje istorije deformisanja važno je poznavati i naponsko stanje u toku deformisanja. Na slici 6.24 je dat prikaz naponskog stanja u pravcu kretanja alata σ_z dok je naponsko stanje normalno na kretanja alata σ_x prikazano na slici 6.25. U oba slučaja su prikazana naponska stanja za 6 faza deformisanja, kao što je slučaj kod deformacionog stanja. Oblasti u kojima su naponi posmatrani, kao i vrednosti napona za svaku fazu su numerički naznačeni.

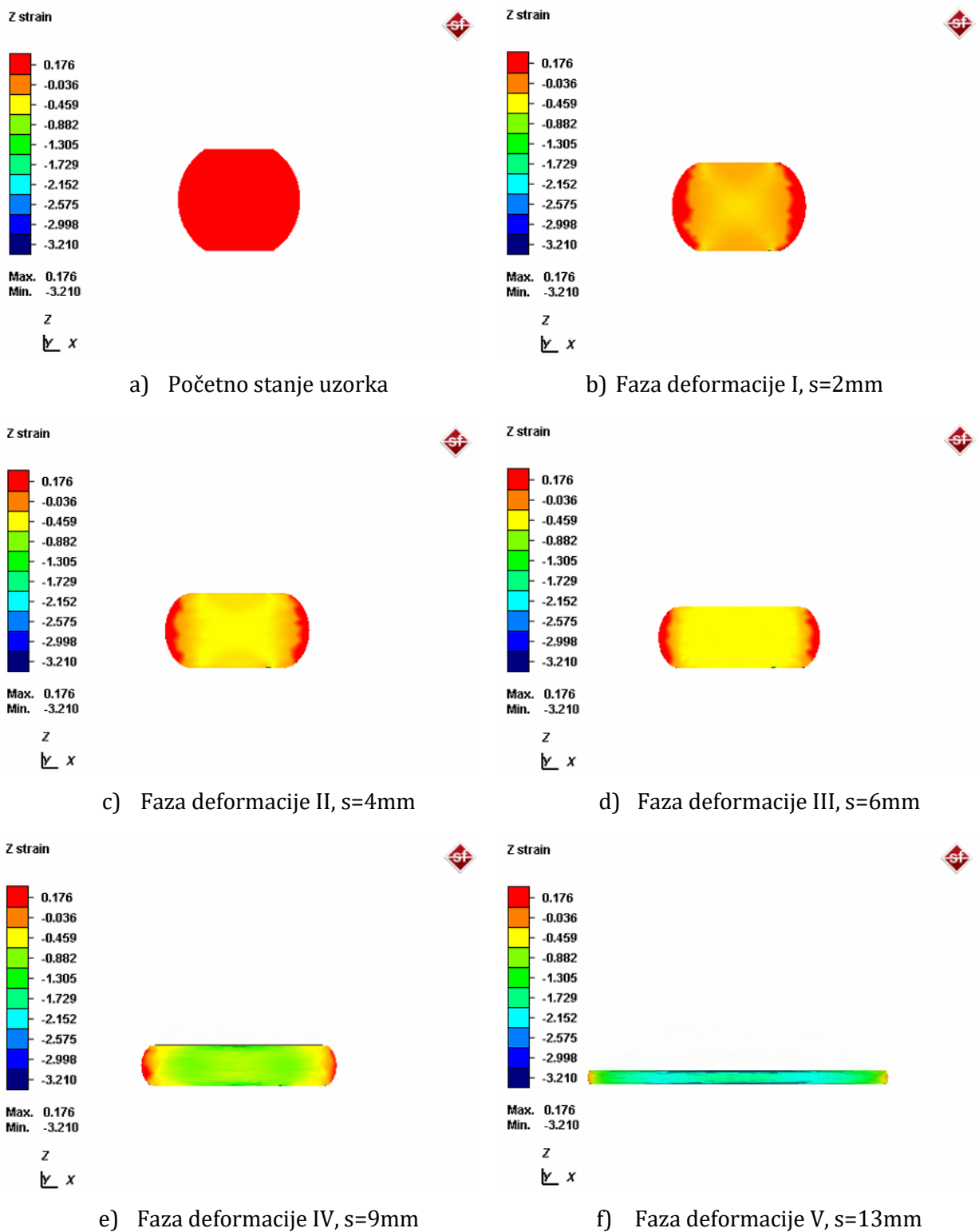
Posmatranjem slika 6.20 i 6.21 zaključuje se da su maksimalne deformacije ostvarene pri hodu od 13mm. Ostvarena deformacija u z pravcu je dostigla vrednost od -1,230 dok je u pravcu x ta vrednost 0,9.

S druge strane, pri istom hodu napon u pravcu z ose je dostigao vrednost od -719MPa dok je u pravcu x vrednost napona dostigla 204MPa.

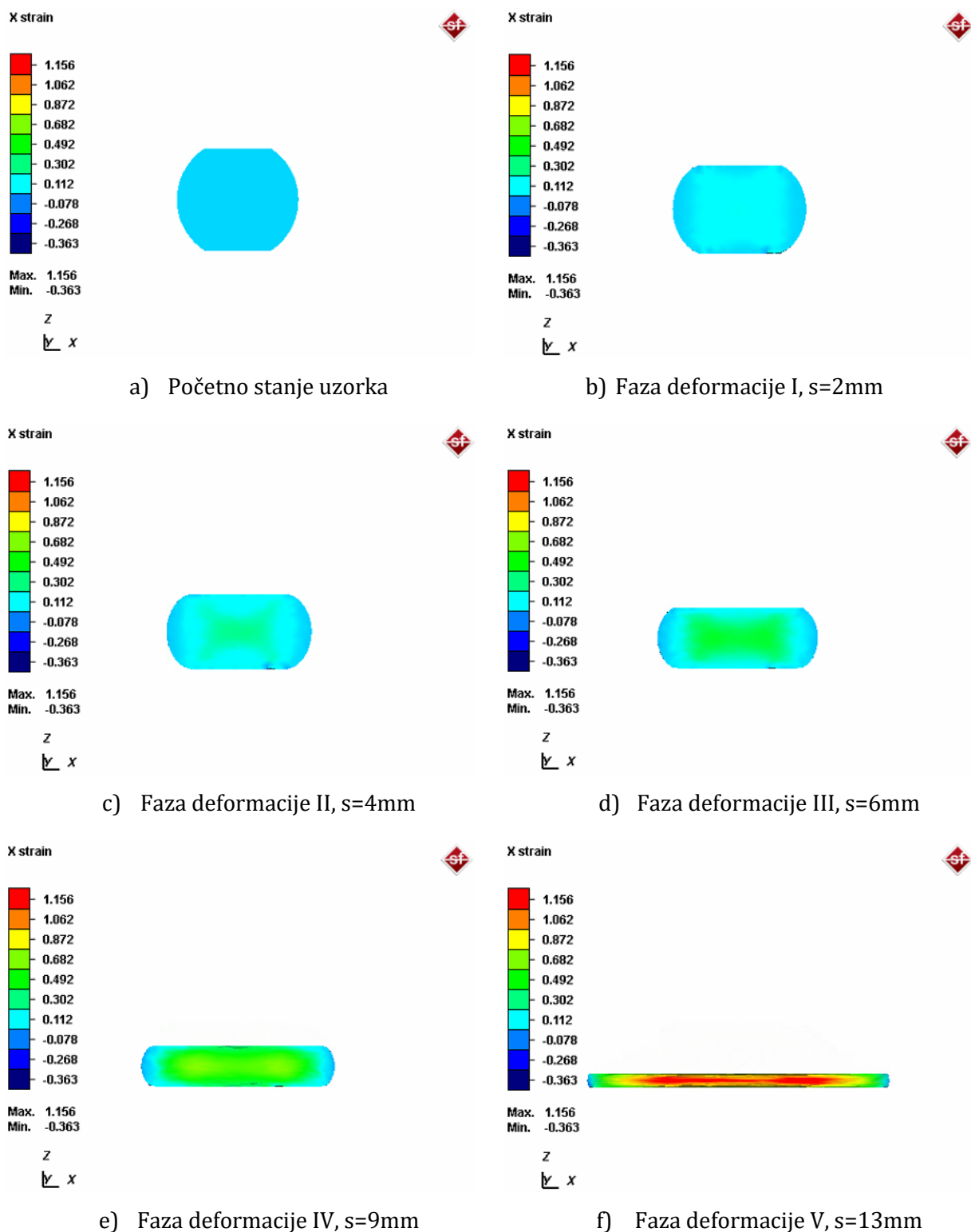
Vrednosti napona i deformacija grupe uzoraka C_Z ostvarenih u simulaciji su dati u tabeli 6.4. Pokazatelj naponskog stanja β izračunat na osnovu deformacionog koncepta kao i pokazatelj naponskog stanja β_{NS} izračunat na osnovu naponskog koncepta su prikazani u tabeli 6.4 (proračun izvršen na osnovu metodologije prikazane u poglavlju 4.3).

Tabela 6.4 Vrednosti deformacija, napona i pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka C_Z

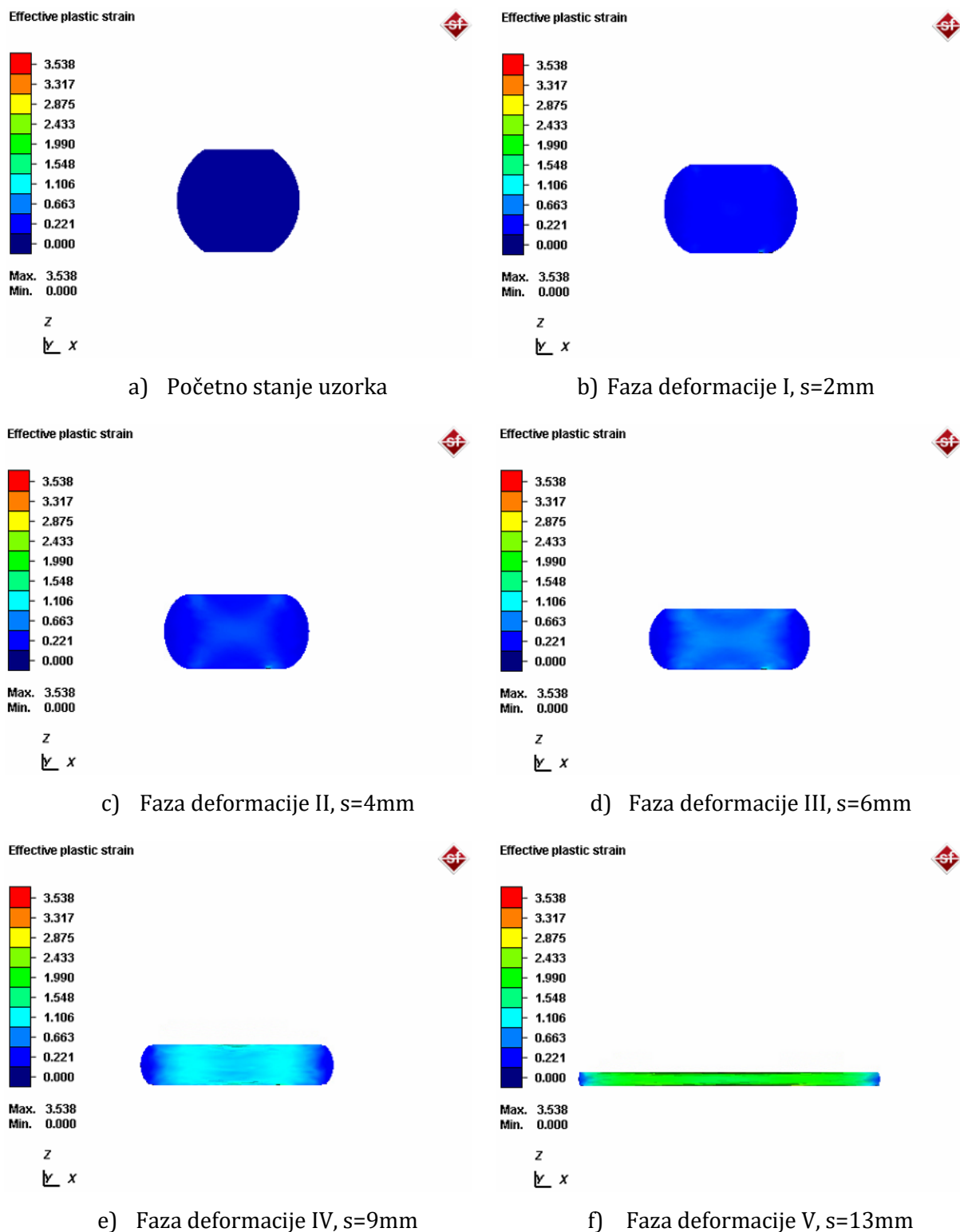
Br.	φ_z	φ_θ	φ_e	β	σ_z	σ_θ	σ_e	β_{NS}
0	0,000	0,000	0,000	-0,496	0,000	0,000	0,000	-0,730
1	-0,130	0,100	0,136	-0,501	-483	190	600	-0,488
2	-0,420	0,310	0,436	-0,512	-565	147	686	-0,609
3	-0,560	0,410	0,580	-0,516	-616	174	740	-0,597
4	-0,800	0,590	0,830	-0,524	-612	253	814	-0,441
5	-1,230	0,900	1,273	-0,538	-719	204	998	-0,516



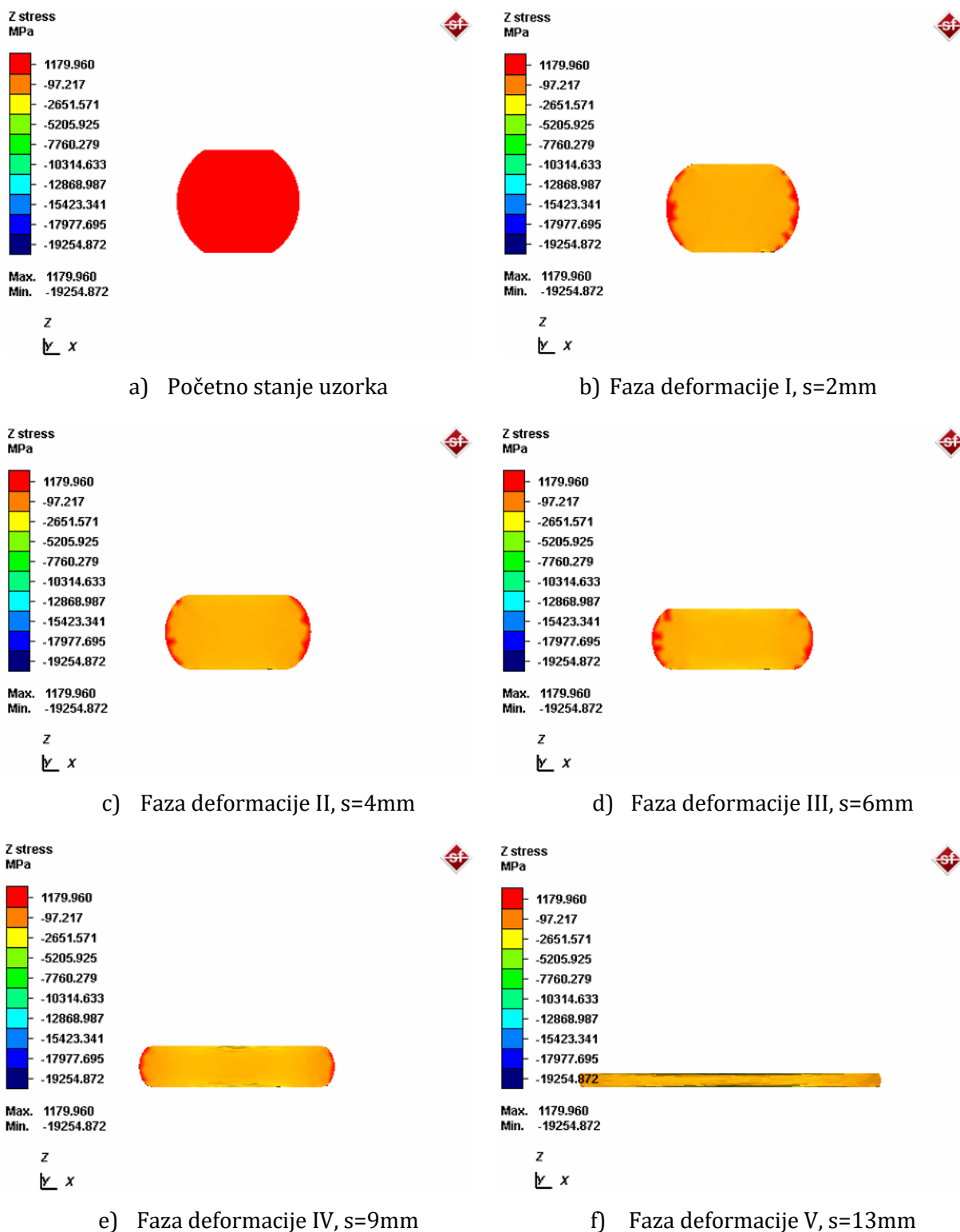
Slika 6.20 Deformaciono stanje u pravcu kretanja alata φ_z za grupu uzoraka C_Z



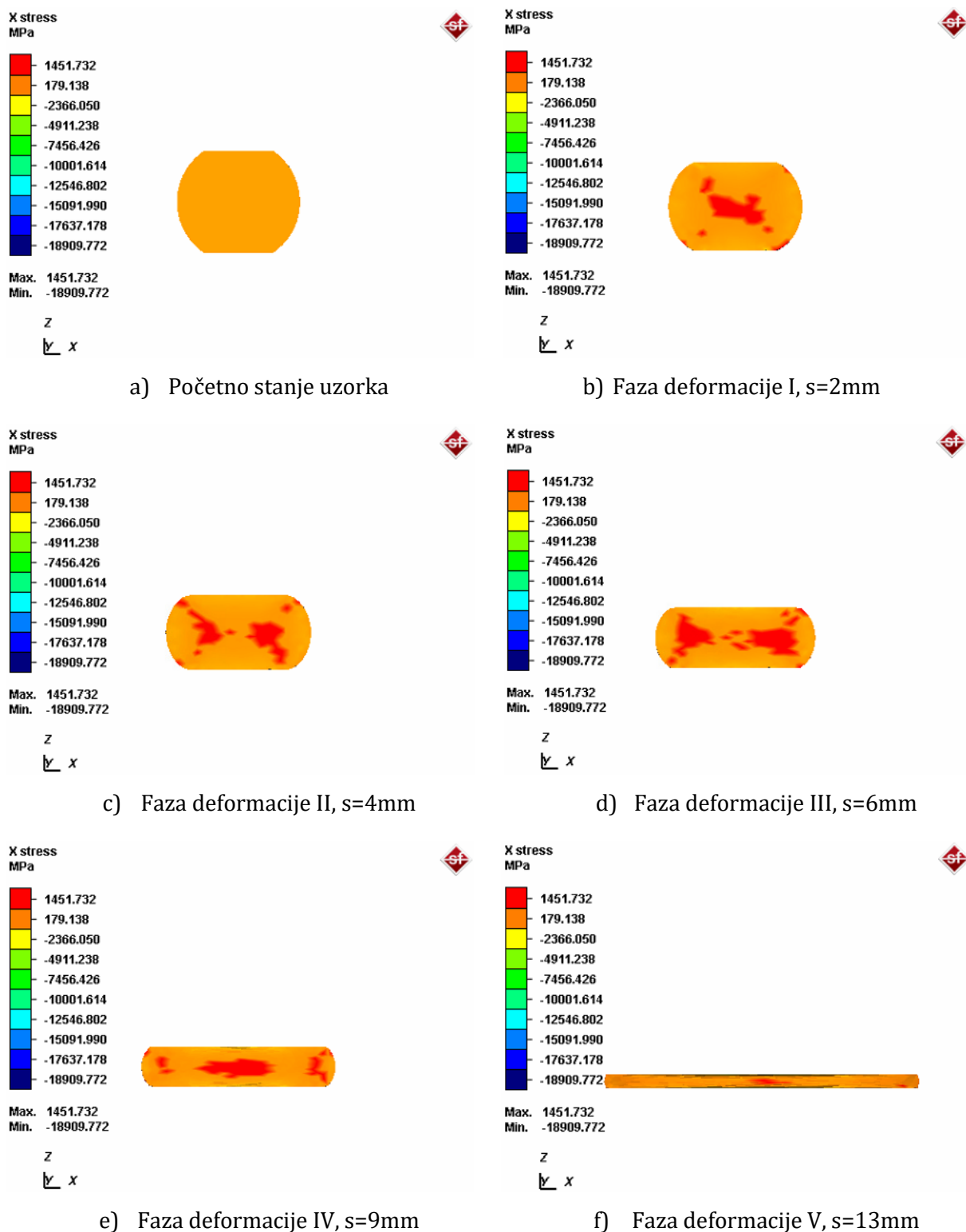
Slika 6.21 Deformaciono stanje u x pravcu φ_x za grupu uzoraka C_Z



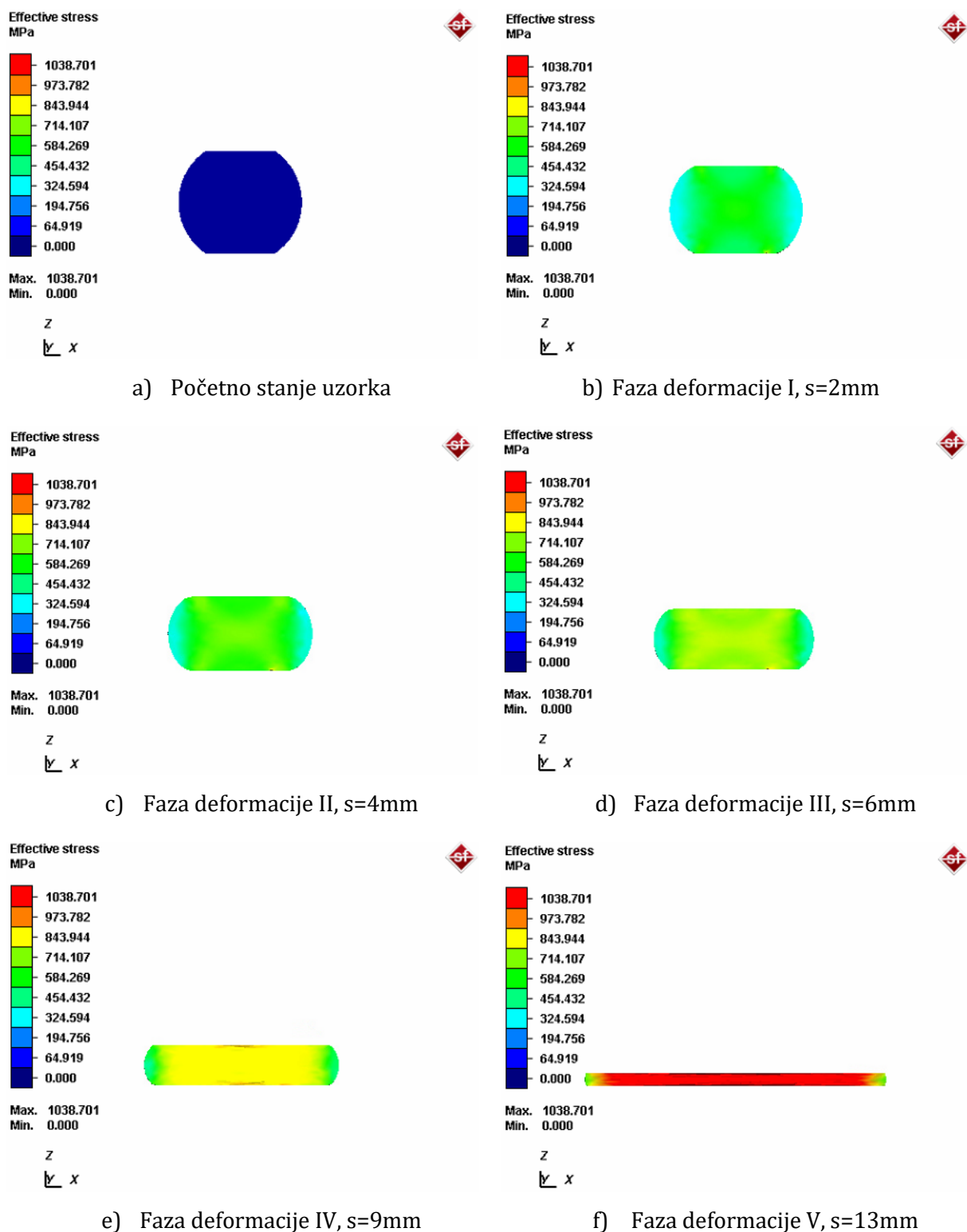
Slika 6.22 Efektivna deformacija za grupu uzoraka C_Z



Slika 6.23 Naponsko stanje u pravcu kretanja alata σ_z za grupu uzoraka C_Z



Slika 6.24 Naponsko stanje u x pravcu σ_x za grupu uzoraka C_Z



Slika 6.25 Efektivni napon za grupu uzoraka C_Z

6.9.4 NUMERIČKA ANALIZA SABIJANJA UZORAKA GRUPE CO_KRA RAVNIM I KONUSNIM ALATIMA

Deformaciono stanje modela deformisanja CO_KRA u pravcu kretanja alata (φ_z) je prikazano na slici 6.26.

Rezultati simulacije su predstavljeni u 6 faza, što u potpunosti odgovara fazama deformisanja ostvarenim prilikom eksperimentalne analize. Za svaku fazu je dat prikaz ostvarene deformacije na lateralnoj površini na istoj poziciji kao i kod eksperimentalnih istraživanja.

Na slici 6.27 dat je prikaz deformacionog stanja modela deformisanja CO_KRA u tangencijalnom pravcu φ_θ . Faze deformisanja prikazane na slici 6.27 u potpunosti odgovaraju fazama ostvarenim u eksperimentu.

Pored deformacionog stanja za određivanje istorije deformisanja važno je poznavati i naponsko stanje u toku deformisanja. Na slici 6.28 je dat prikaz naponskog stanja u pravcu kretanja alata σ_z dok je naponsko stanje u tangencijalnom pravcu σ_θ prikazano na slici 6.29. U oba slučaja su prikazana naponska stanja za 6 faza deformisanja, kao što je slučaj kod deformacionog stanja. Oblasti u kojima su naponi posmatrani, ako i vrednosti napona za svaku fazu su numerički naznačeni. Na slici 6.29 dat je prikaz efektivne deformacije po fazama za grupu uzoraka CO_KRA, dok je na slici 6.30 prikazan efektivni napon za ovu grupu uzoraka.

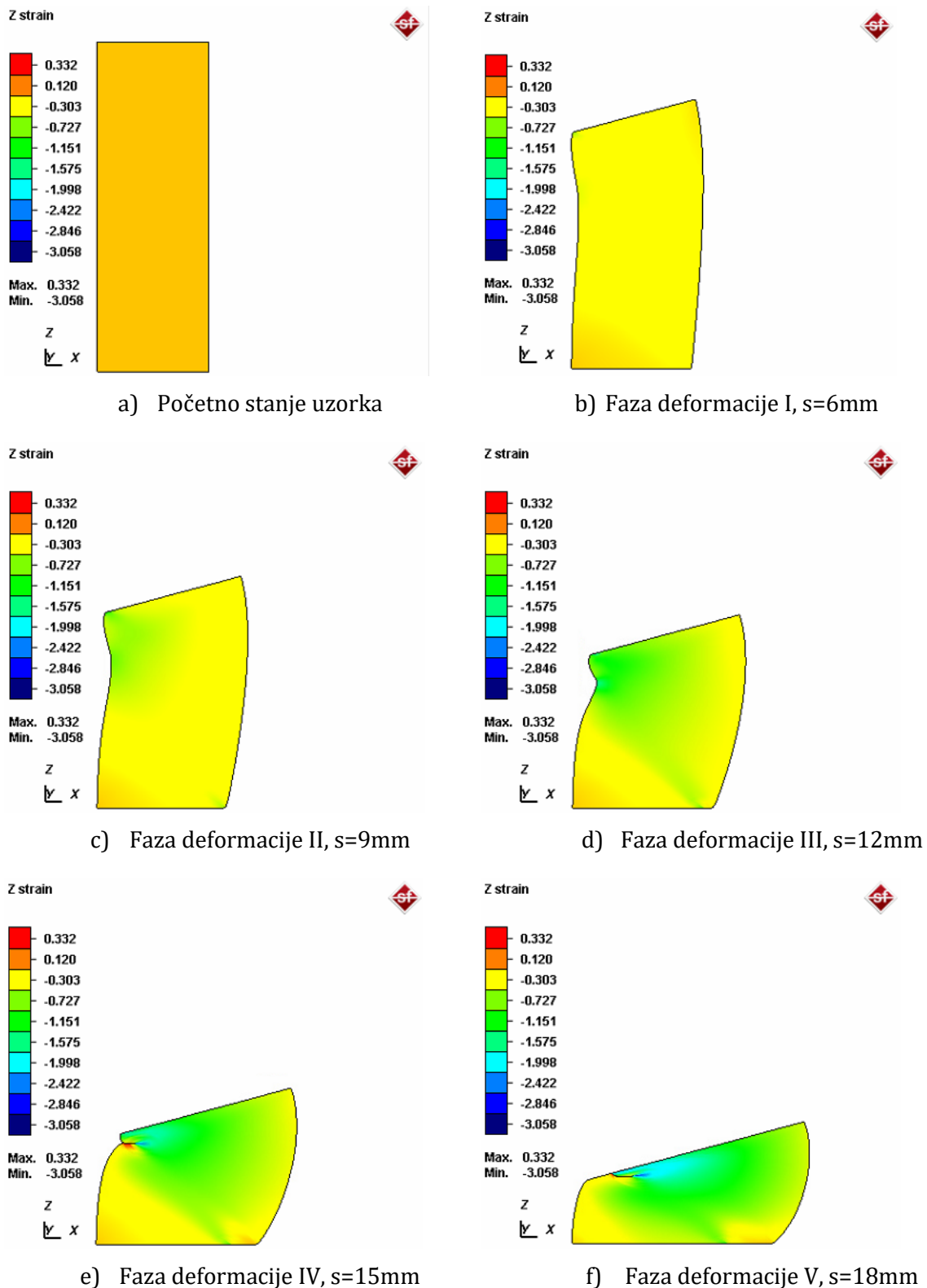
Posmatranjem slika 6.26 i 6.27 zaključuje se da su maksimalne deformacije ostvarenje pri hodu od 13mm. Ostvarena deformacija u z pravcu je dostigla vrednost od -0,536 dok je u tangencijalnom pravcu ta vrednost 0,69.

S druge strane, pri istom hodu napon u pravcu z ose je dostigao vrednost od -184MPa dok je u tangencijalnom pravcu vrednost napona dostigla 682MPa, slika 6.27-1 i 6.28.

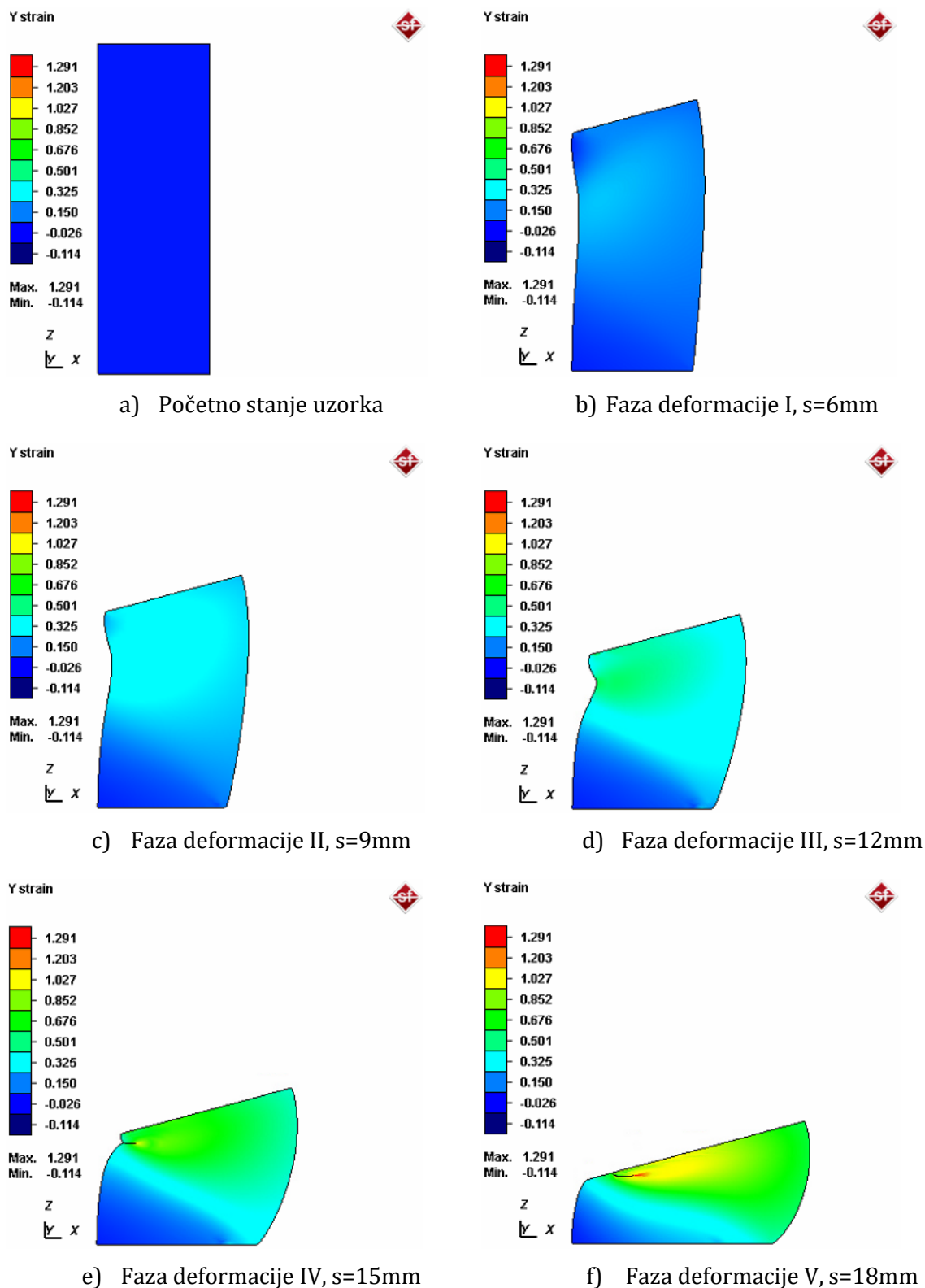
Vrednosti napona i deformacija grupe uzoraka CO_KRA ostvarenih u simulaciji su dati u tabeli 6.5. Pokazatelj naponskog stanja β izračunat na osnovu deformacionog koncepta kao i pokazatelj naponskog stanja β_{NS} izračunat na osnovu naponskog koncepta su prikazani u tabeli 6.5 (proračun izvršen na osnovu metodologije prikazane u poglavlju 4.3).

Tabela 6.5 Vrednosti deformacija, napona i pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka CO_KRA

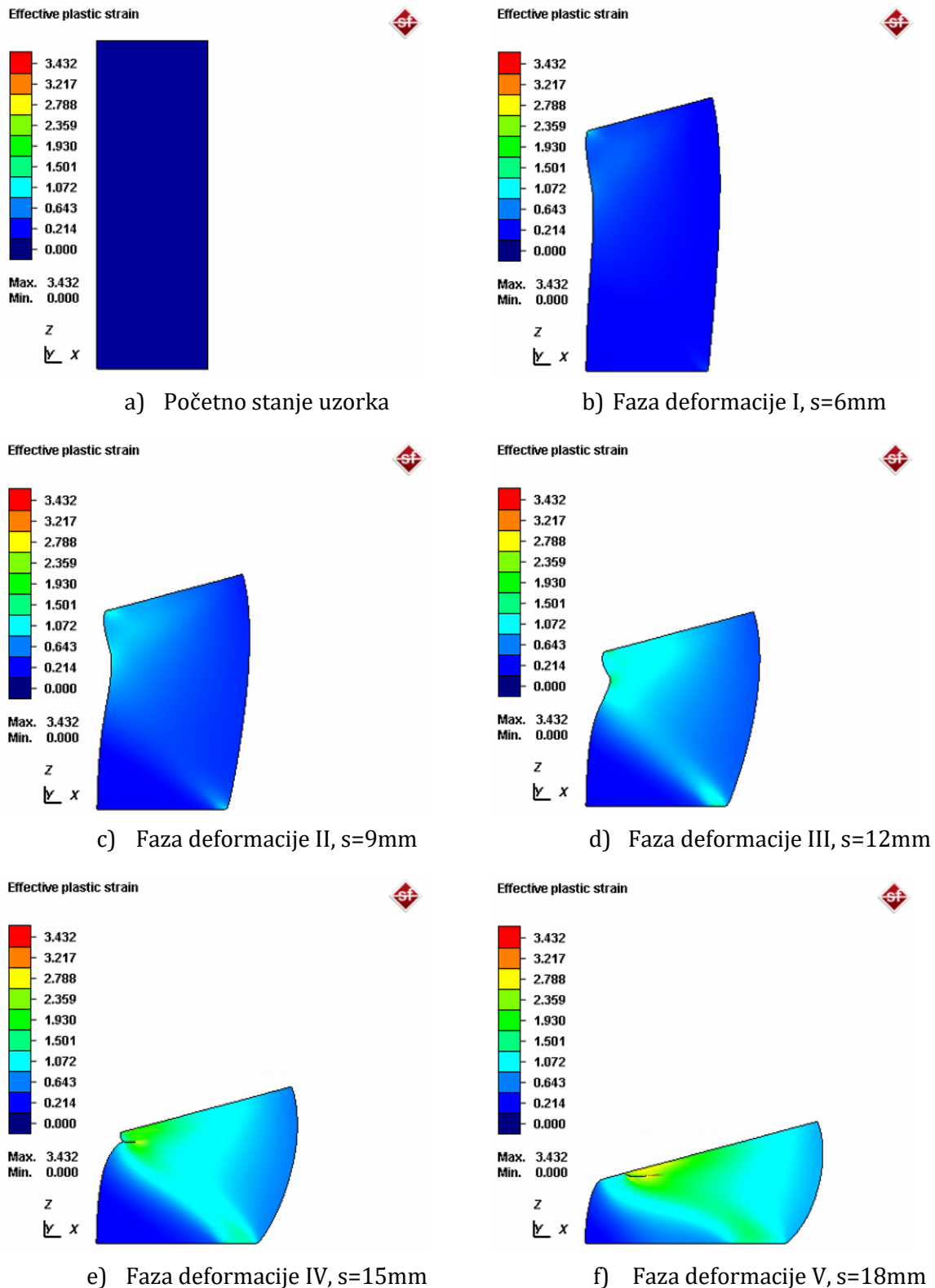
Br.	φ_z	φ_θ	φ_e	β	σ_z	σ_θ	σ_e	β_{NS}
0	0,000	0,000	0,000	0,227	0,000	0,000	0,000	-1,151
1	-0,120	0,150	0,159	0,317	-0,489	136	569	-0,620
2	-0,242	0,300	0,318	0,393	-0,434	301	638	-0,208
3	-0,335	0,400	0,429	0,448	-0,276	506	689	0,334
4	-0,438	0,540	0,574	0,505	-201	610	731	0,560
5	-0,536	0,690	0,724	0,556	-184	682	776	0,642



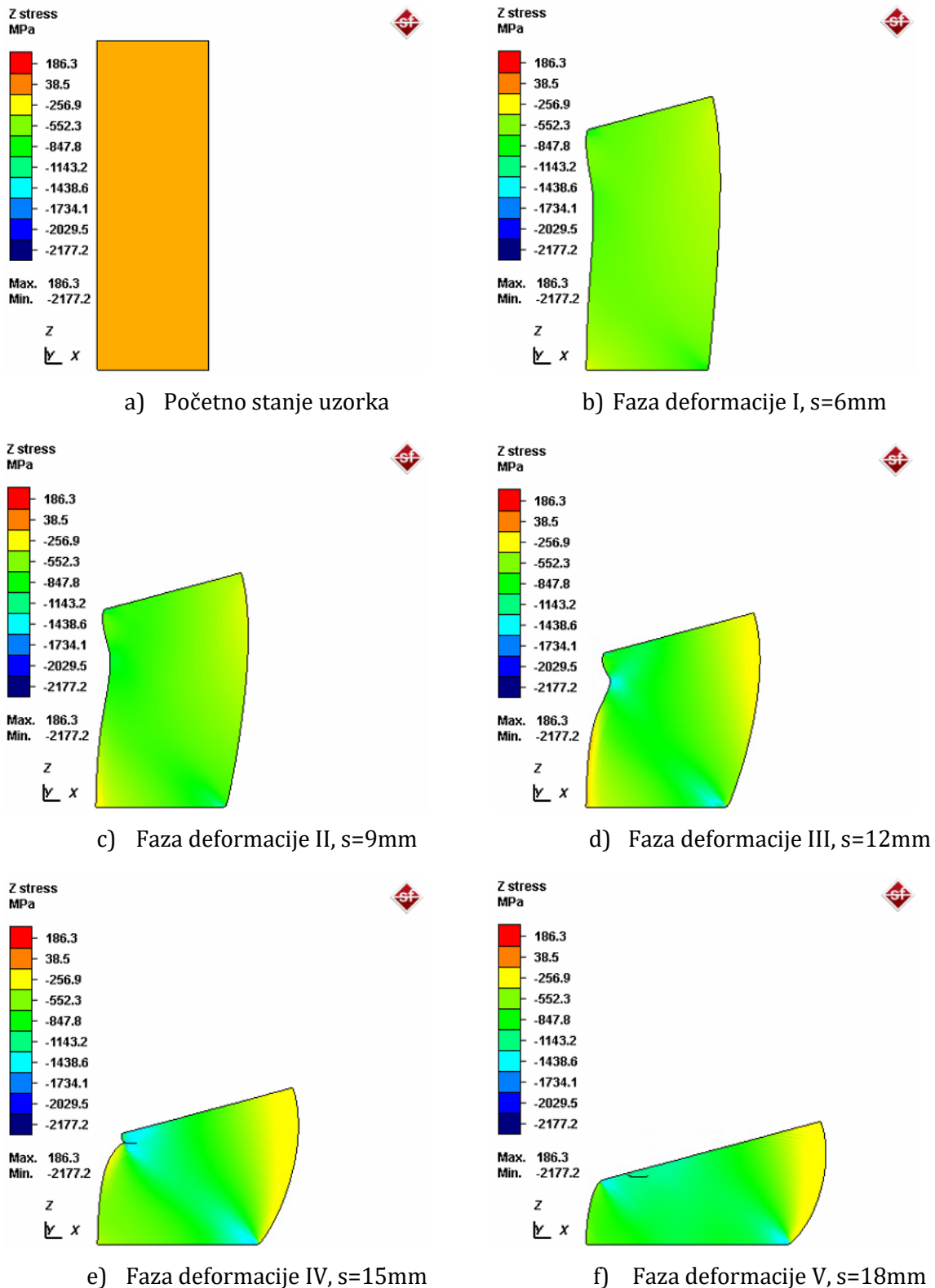
Slika 6.26 Deformaciono stanje u pravcu kretanja alata φ_z za grupu uzoraka CO_KRA



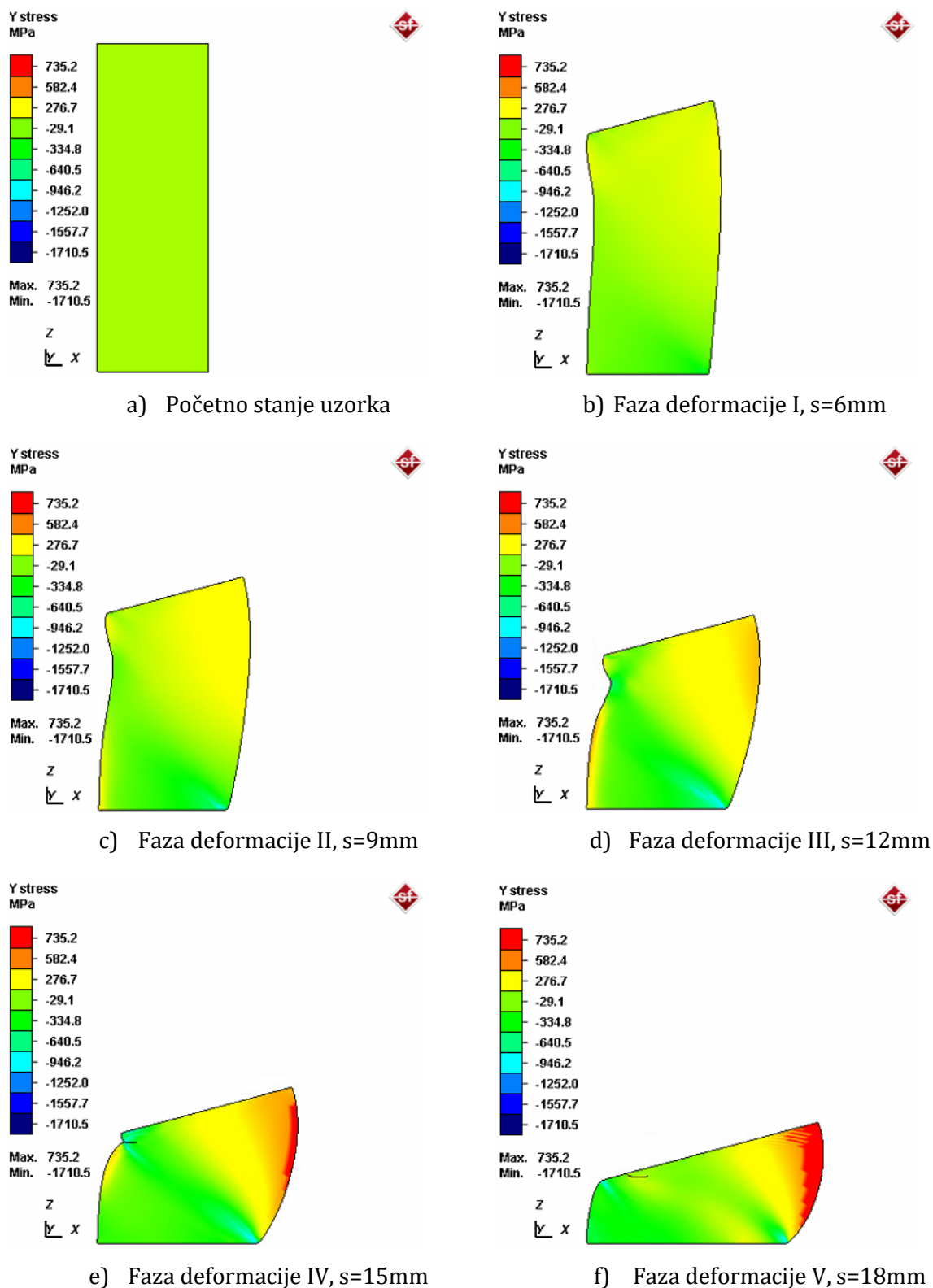
Slika 6.27 Deformaciono stanje u tangencijalnom pravcu φ_θ za grupu uzoraka CO_KRA



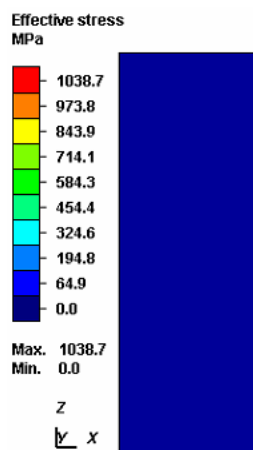
Slika 6.28 Efektivna deformacija za grupu uzoraka CO_KRA



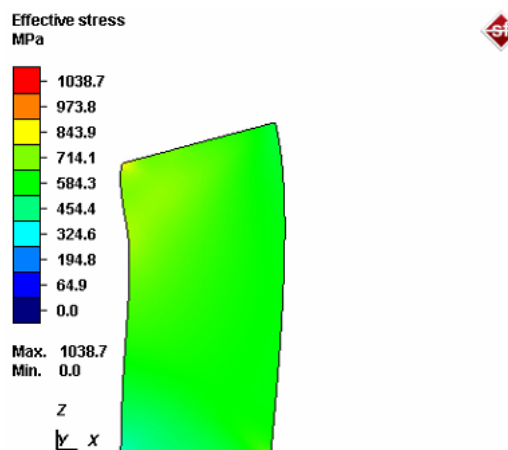
Slika 6.29 Naponsko stanje u pravcu kretanja alata σ_z za grupu uzoraka CO_KRA



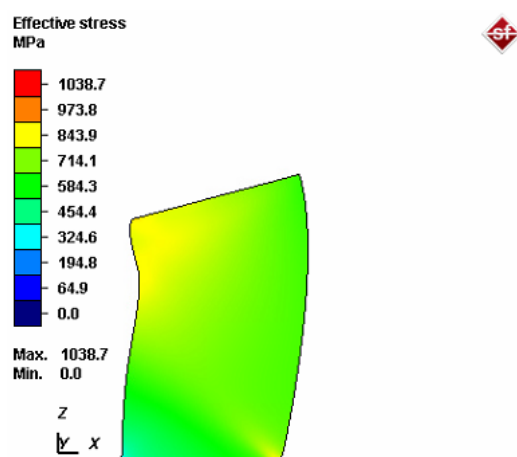
Slika 6.30 Naponsko stanje u tangencijalnom pravcu σ_{θ} za grupu uzoraka CO_KRA



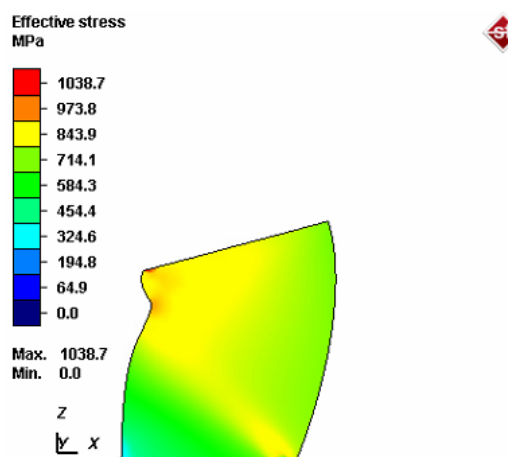
g) Početno stanje uzorka



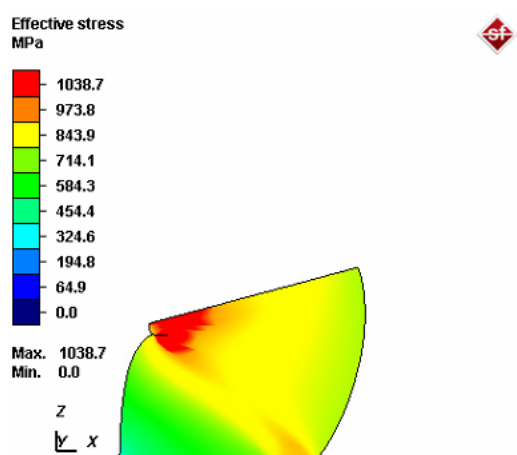
h) Faza deformacije I, s=6mm



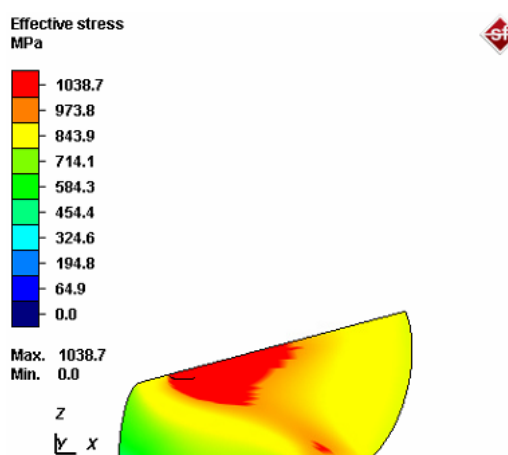
i) Faza deformacije II, s=9mm



j) Faza deformacije III, s=12mm



k) Faza deformacije IV, s=15mm



l) Faza deformacije V, s=18mm

Slika 6.31 Efektivni napon za grupu uzoraka CO_KRA

6.9.5 NUMERIČKA ANALIZA SABIJANJA UZORKA GRUPE C_3D RAVNIM ALATIMA

Deformaciono stanje modela deformisanja C_3D u pravcu kretanja alata (φ_z) je prikazano na slici 6.32. Kao što se može videti na slici 6.32, rezultati simulacije su predstavljeni u 6 faza, što u potpunosti odgovara fazama deformisanja ostvarenim prilikom eksperimentalne analize. Za svaku fazu je dat prikaz ostvarene deformacije na lateralnoj površini na istoj poziciji kao i kod eksperimentalnih istraživanja.

Na slici 6.33 dat je prikaz deformacionog stanja modela deformisanja C_3D u tangencijalnom pravcu φ_θ . Faze deformisanja prikazane na slici 6.33 u potpunosti odgovaraju fazama ostvarenim u eksperimentu.

Pored deformacionog stanja za određivanje pokazatelja naponskog stanja važno je poznavati i naponsko stanja u toku deformisanja. Na slici 6.34 je dat prikaz naponskog stanja u pravcu kretanja alata σ_z dok je naponsko stanje u tangencijalnom pravcu σ_θ prikazano na slici 6.35 U oba slučaja su prikazana naponska stanja za 6 faza deformisanja, kao što je slučaj kod deformacionog stanja.

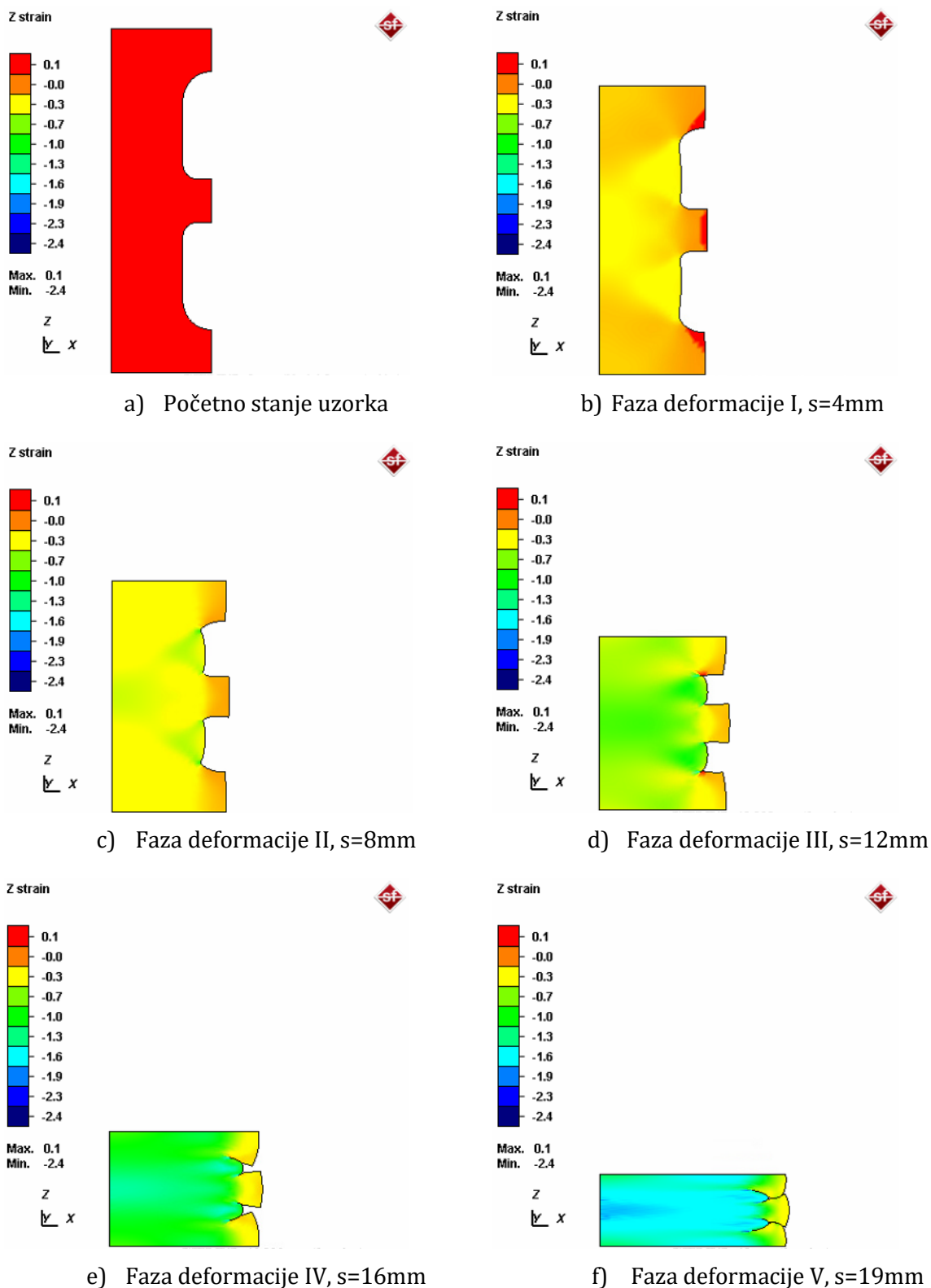
Posmatranjem slika 6.32 i 6.33 zaključuje se da su maksimalne deformacije ostvarenje pri hodu od 19mm. Ostvarena deformacija u z pravcu je dostigla vrednost od -0,23 dok je u tangencijalnom pravcu ta vrednost 0,63.

S druge strane, pri istom hodu napon u pravcu z ose je dostigao vrednost od -28MPa dok je u tangencijalnom pravcu vrednost napona dostigla 744MPa. Ako se posmatra slika 6.35, moguće je primetiti da vrednosti napona σ_z konstantno rastu do hoda od 16mm da bi u poslednjoj fazi ta vrednost naglo opala. Ovo se može objasniti određenim „pikom“ u simulaciji koji daje „pogrešne“ rezultate. Međutim, ovo je samo pretpostavka koja za dokazivanje zahteva dodatna istraživanja.

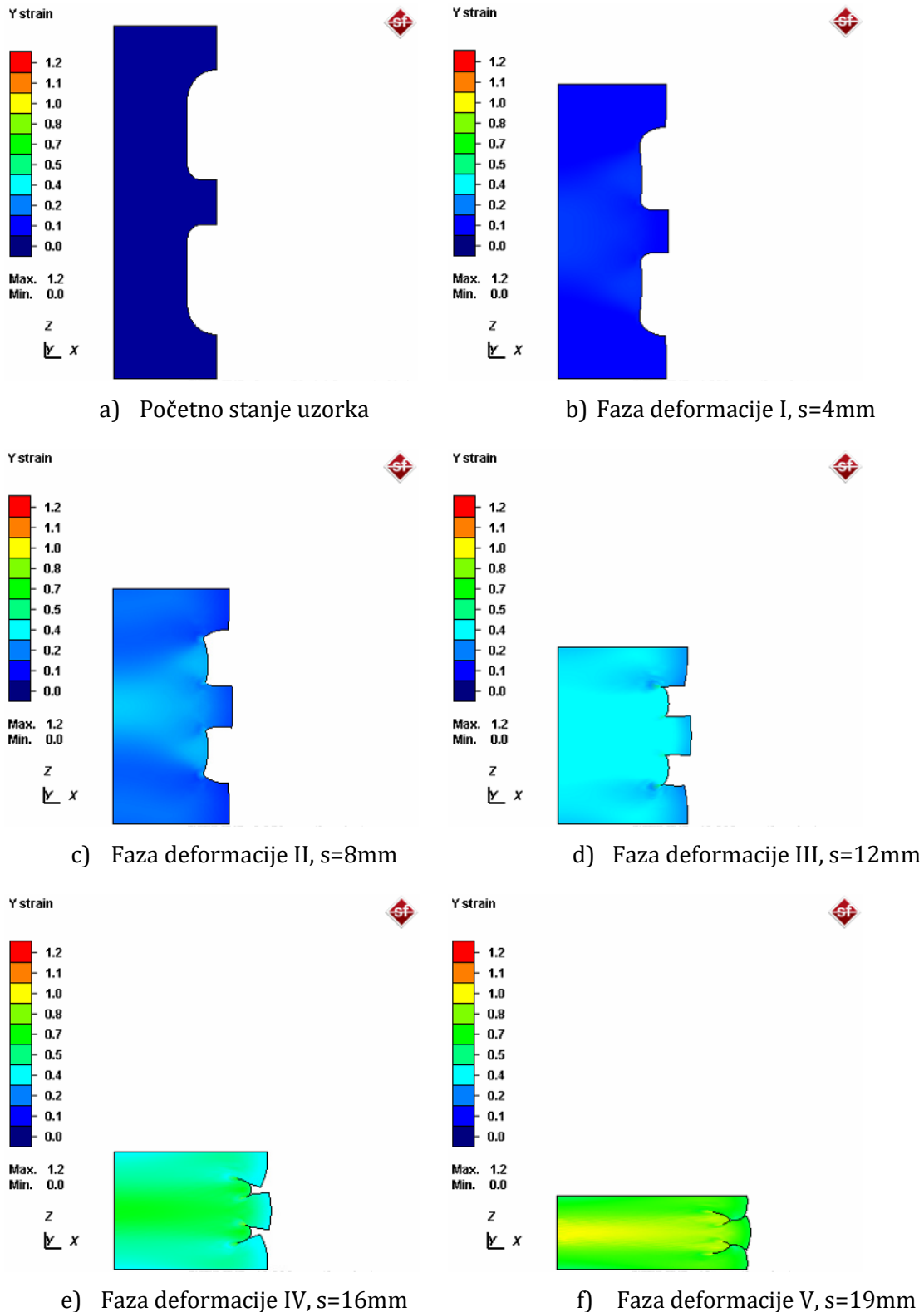
Vrednosti napona i deformacija grupe uzoraka C_3D ostvarenih u simulaciji su dati u tabeli 6.6. Pokazatelj naponskog stanja β izračunat na osnovu deformacionog koncepta kao i pokazatelj naponskog stanja β_{NS} izračunat na osnovu naponskog koncepta su prikazani u tabeli 6.6 (proračun izvršen na osnovu metodologije prikazane u poglavlju 4.3).

Tabela 6.6 Vrednosti deformacija, napona i pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka C_3D

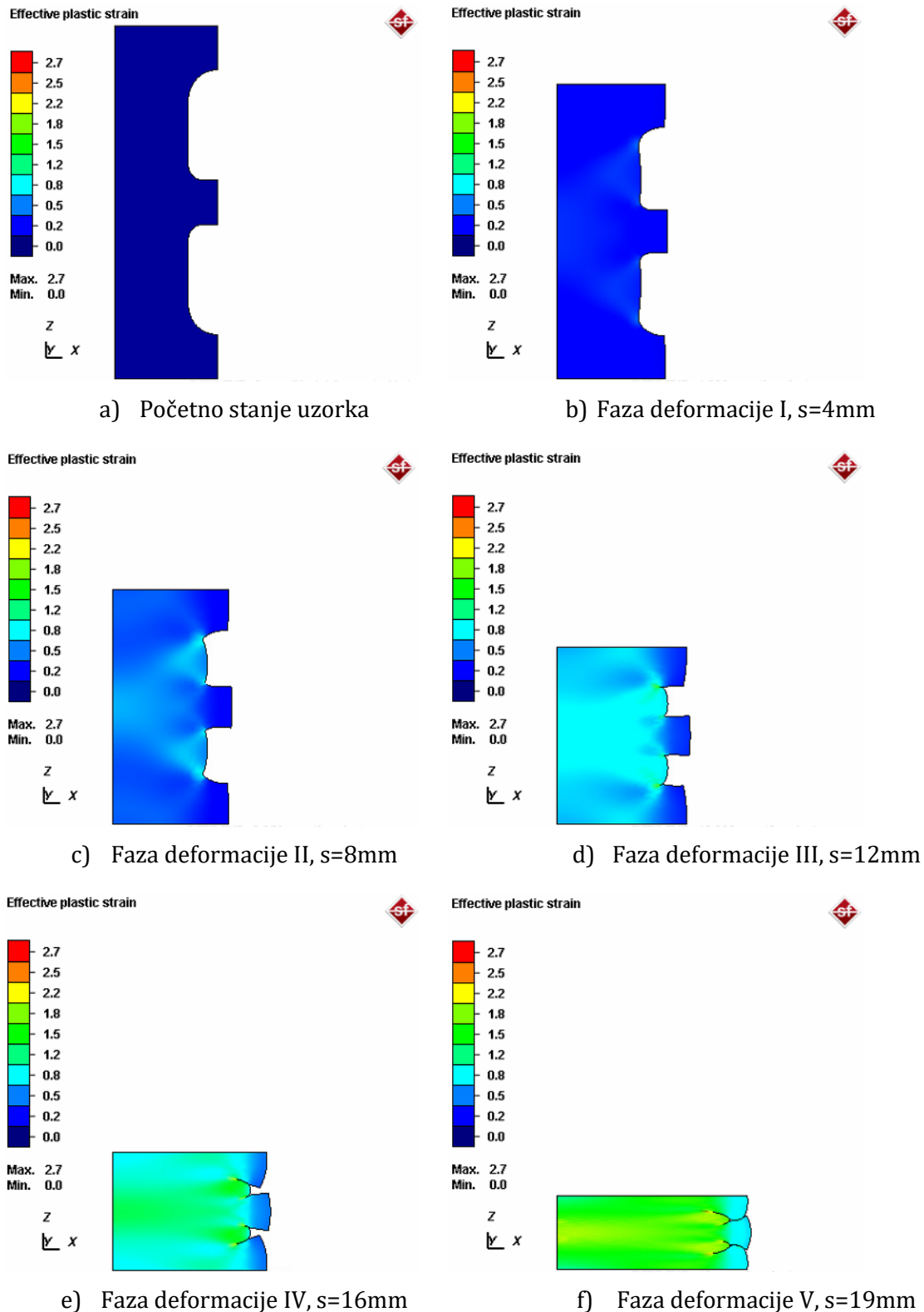
Br.	φ_z	φ_θ	φ_e	β	σ_z	σ_θ	σ_e	β_{NS}
0	0,000	0,000	0,000	1,317	0,000	0,000	0,000	1,131
1	-0,025	0,066	0,067	1,312	67	490	474	1,175
2	-0,054	0,148	0,150	1,298	98	575	544	1,237
3	-0,089	0,258	0,262	1,275	128	652	611	1,277
4	-0,139	0,420	0,428	1,248	146	735	684	1,288
5	-0,230	0,630	0,638	1,180	-28	744	756	1,183



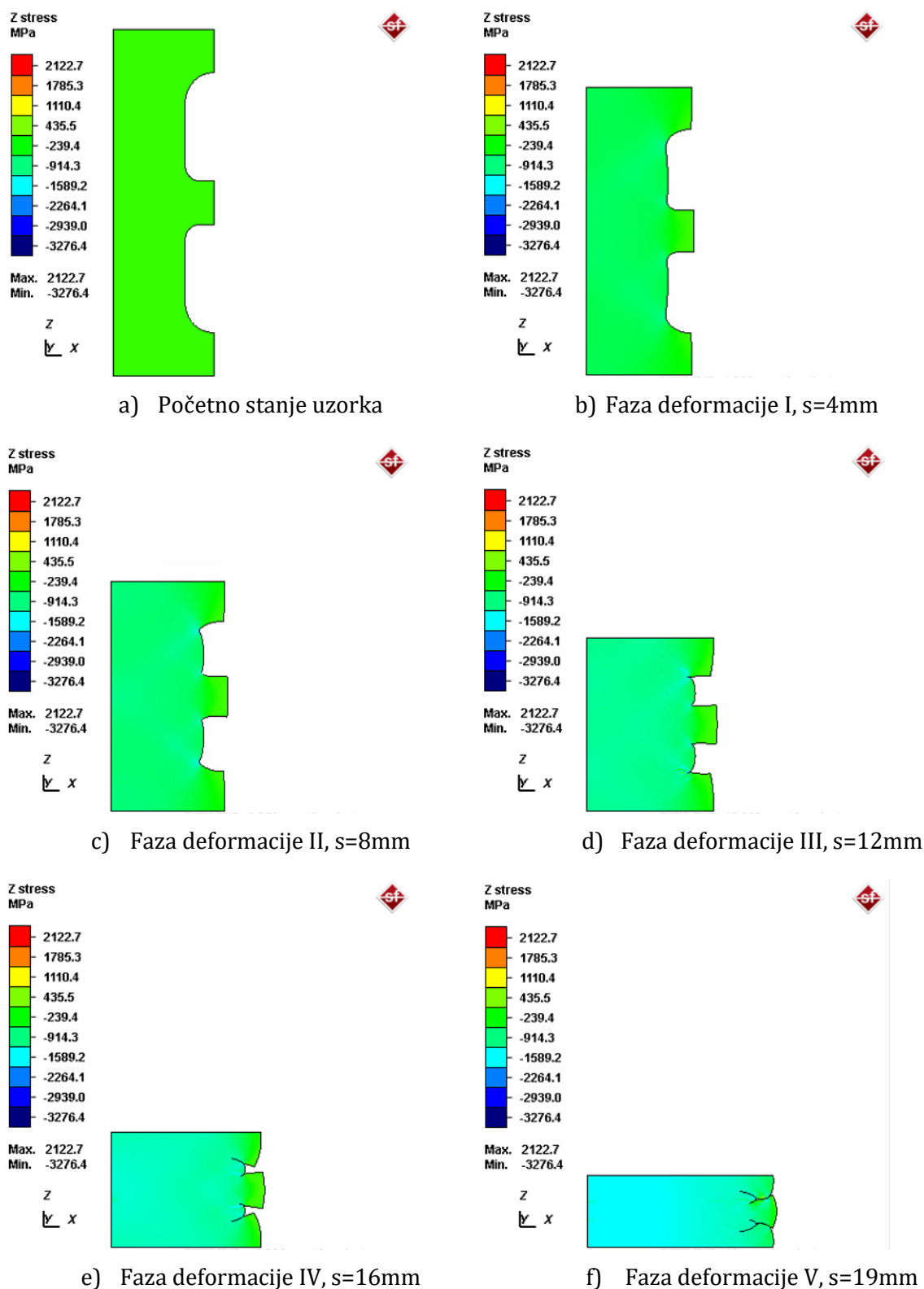
Slika 6.32 Deformaciono stanje u pravcu kretanja alata φ_z za grupu uzoraka C_3D



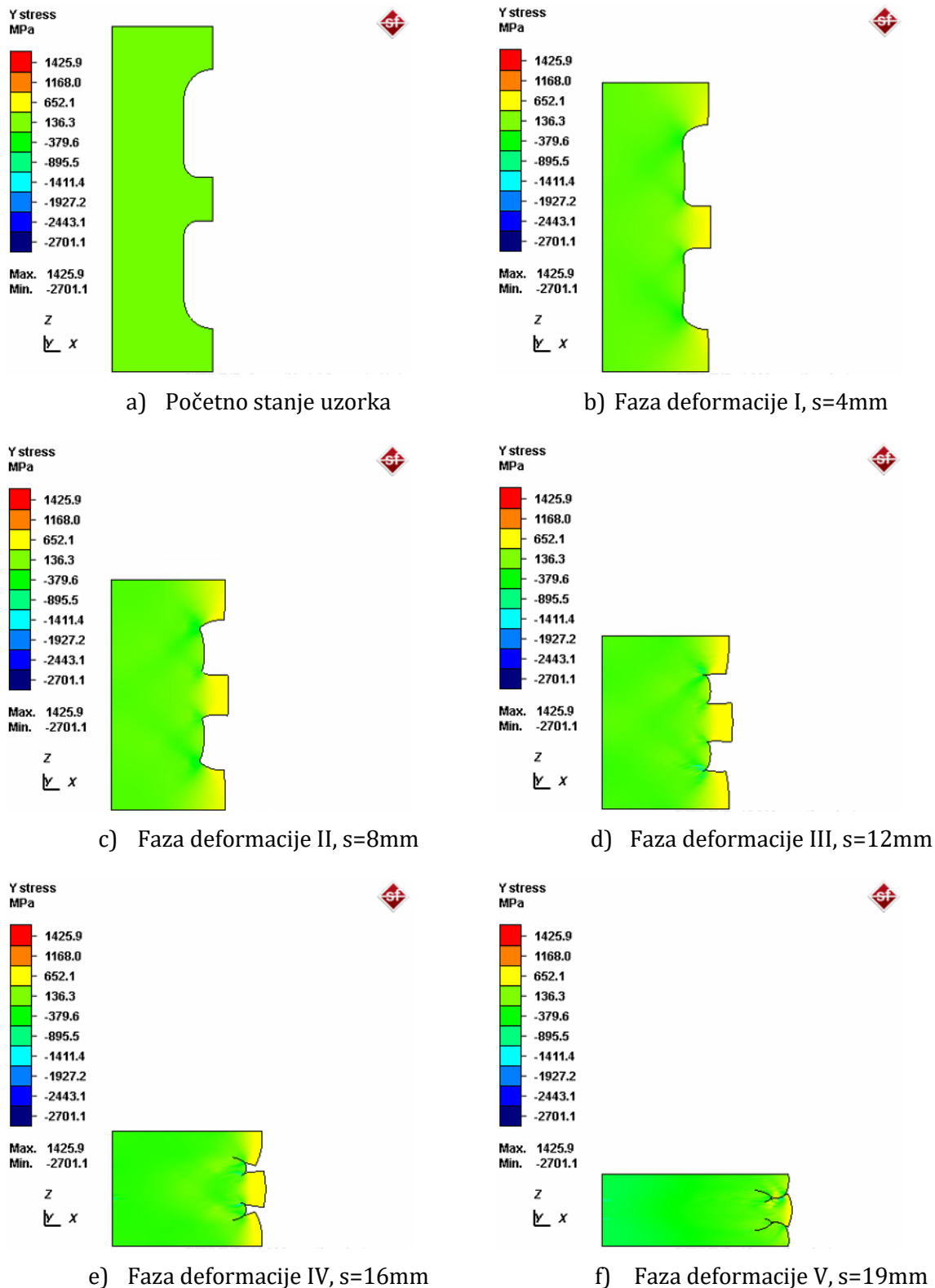
Slika 6.33 Deformaciono stanje u tangencijalnom pravcu φ_{θ} za grupu uzoraka C_3D



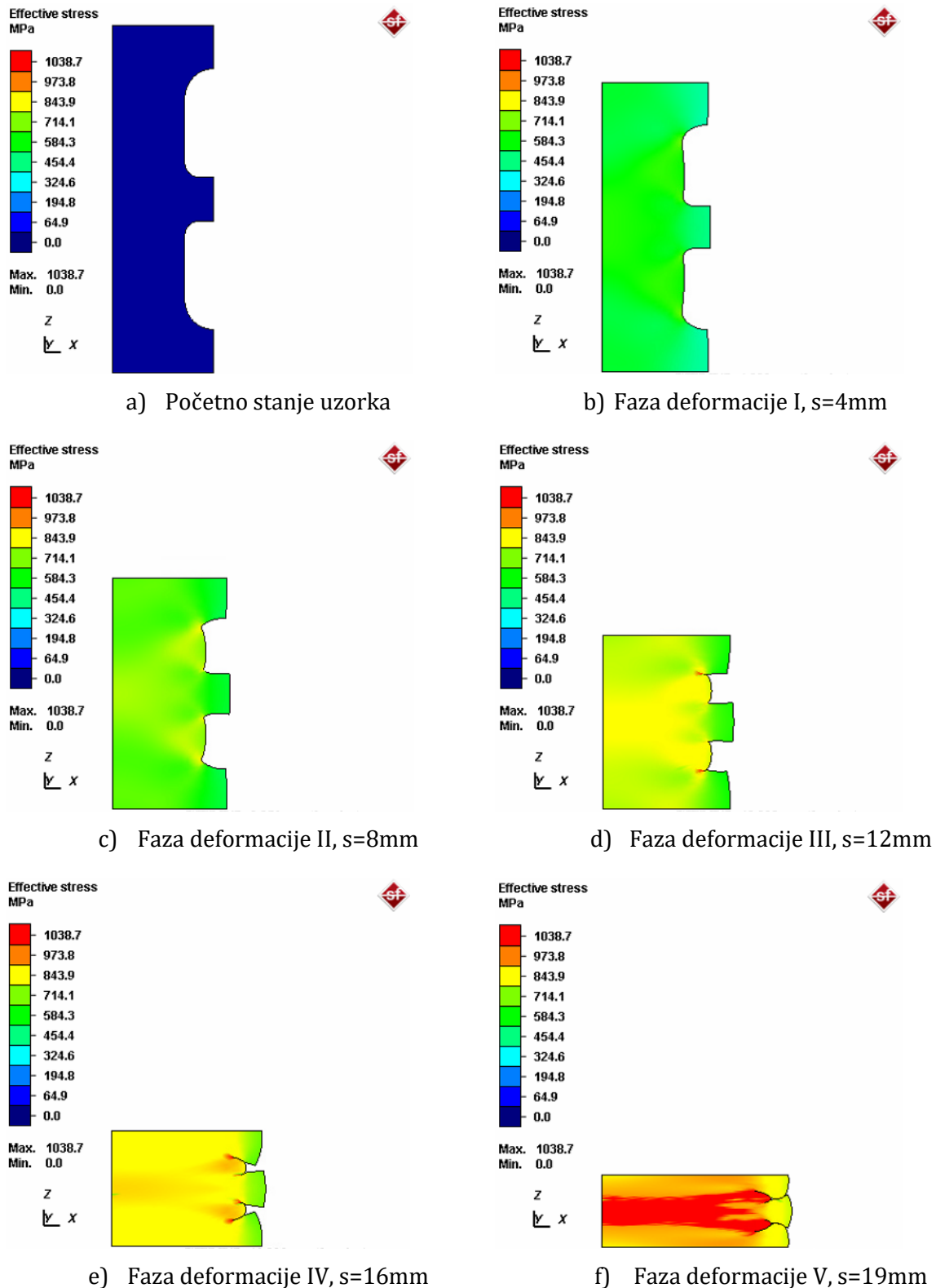
Slika 6.34 Efektivna deformacija za grupu uzoraka C_3D



Slika 6.35 Naponsko stanje u pravcu kretanja alata σ_z za grupu uzoraka C_3D



Slika 6.36 Naponsko stanje u tangencijalnom pravcu σ_{θ} za grupu uzoraka C_3D



Slika 6.37 Efektivni napon za grupu uzoraka C_3D

7. UPOREDNI PRIKAZ REZULTATA DEFORMABILNOSTI MATERIJALA OSTVARENIH EKSPERIMENTALNO I NUMERIČKOM SIMULACIJOM

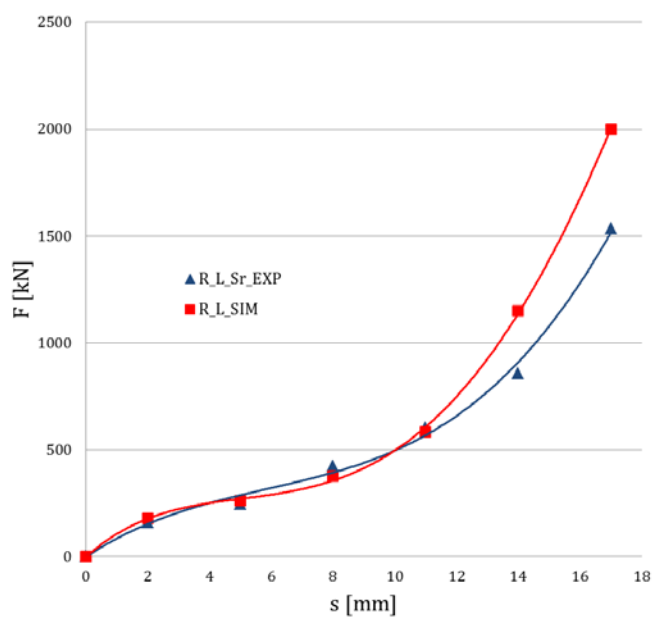
Istraživanje modela deformisanja prikazanih u prethodnim poglavljima imalo je za cilj pronalaženje monotonih procesa deformisanja i ispitivanje mogućnosti njihove primene za definisanje dijagrama granične deformabilnosti. Za određivanje pokazatelja naponskog stanja kao i efektivne granične deformacije primenjena je metodologija prikazana u poglavlju 4.3.

7.1 SABIJANJE UZORAKA GRUPE R_L RAVNIM ALATIMA

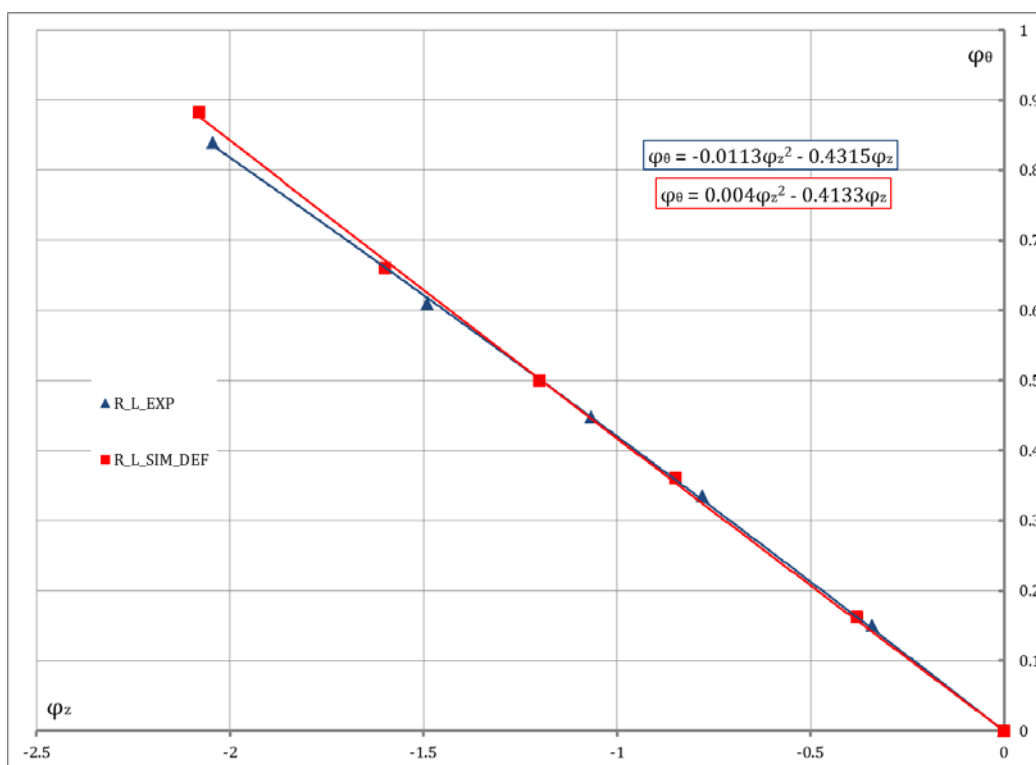
Na slici 7.1 dat je prikaz promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata ostvarenih u simulaciji i eksperimentu za grupu uzoraka R_L. Uvidom u sliku moguće je zaključiti da rezultati MKE i eksperimentalne analize vrednosti deformacione sile pokazuju dobro podudaranje, tako da se MKE model procesa sabijanja ove grupe uzoraka može smatrati pouzdanim.

Usporedni prikaz odnosa logaritamskih deformacija (MKE i eksperiment) je prikazan na slici 7.2. Uvidom u grafik na slici 7.2 moguće je zaključiti da je odnos logaritamskih deformacija približno isti u simulaciji procesa i eksperimentu. Na kraju procesa razlika u vrednosti logaritamskih deformacija φ_z je približno 3% dok je ta razlika u slučaju φ_θ oko 4%. Male razlike u vrednostima logaritamskih deformacija mogu se pripisati nesavršenosti korišćene merne opreme.

Na slici 7.3 je prikazana zavisnost pokazatelja naponskog stanja i efektivne deformacije za grupu uzoraka R_L. Moguće je zaključiti da rezultati simulacije (R_L_SIM) i eksperimenta (E_L_EXP) pokazuju da je pri sabijanju uzoraka grupe R_L ostvareno monotono deformisanje. Na slici 7.3 se uočava da razlika u vrednostima efektivne deformacije i pokazatelja naponskog stanja nije velika. Međutim, kada se pokazatelj naponskog stanja računa na osnovu komponenti napona, direktno očitanih u simulaciji (R_L_SIM_NS), ostvaruje se znatna razlika u rezultatima, što je naročito izraženo na kraju procesa.



Slika 7.1 Deformaciona sila za grupu uzoraka R_L

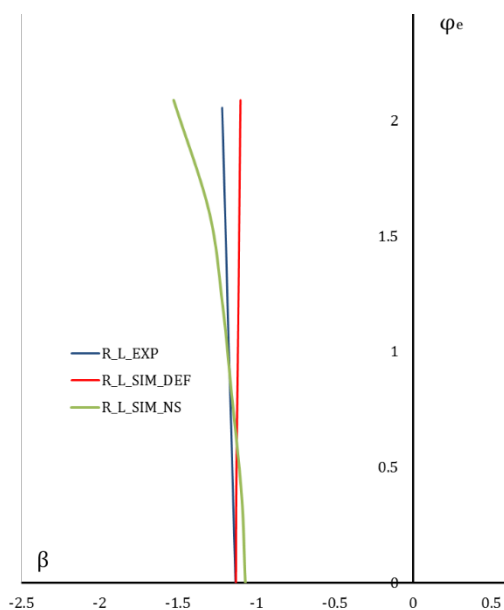


Slika 7.2 Odnos logaritamskih deformacija ostvarenih MKE i eksperimentom za grupu uzoraka R_L

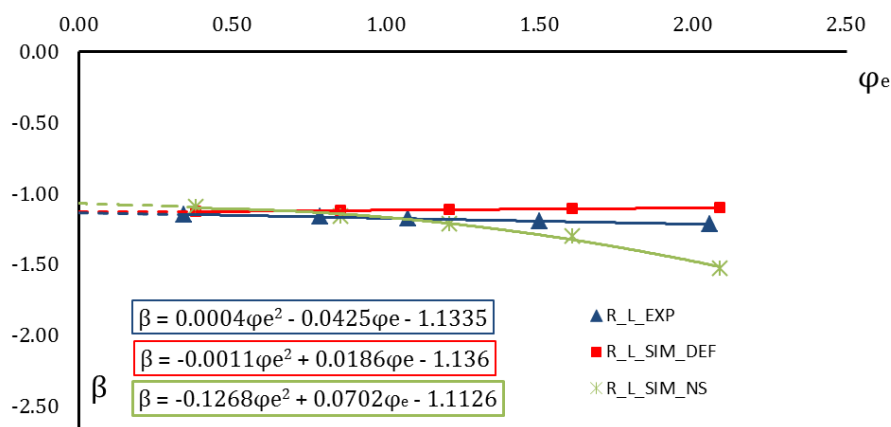
Na osnovu slike 7.4 moguće je uočiti da su tokovi istorija pokazatelja naponskog stanja ostvarenih u simulaciji (R_L_SIM) i eksperimentu (R_L_EXP) ujednačeni. Ovo ukazuje na dobro poklapanje eksperimentalnih i numeričkih rezultata. Međutim, kao i u slučaju pokazatelja

Uporedni prikaz rezultata deformabilnosti materijala ostvarenih eksperimentalno i numeričkom simulacijom

naponskog stanja na slici 7.3, pokazatelj naponskog stanja određen prema naponskom kriterijumu ne daje dobro poklapanje s eksperimentalnim rezultatima (R_L_SIM_NS).



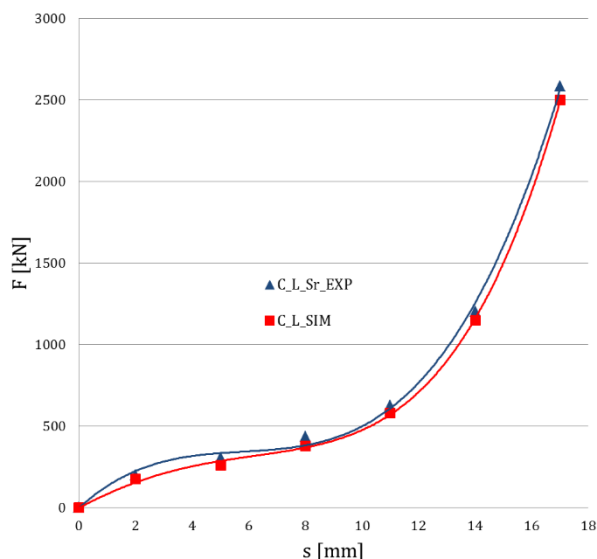
Slika 7.3 Uporedni prikaz promene pokazatelja naponskog stanja β u zavisnosti od efektivne deformacije φ_e za grupu uzoraka R_L određenog simulacijom i eksperimentalno



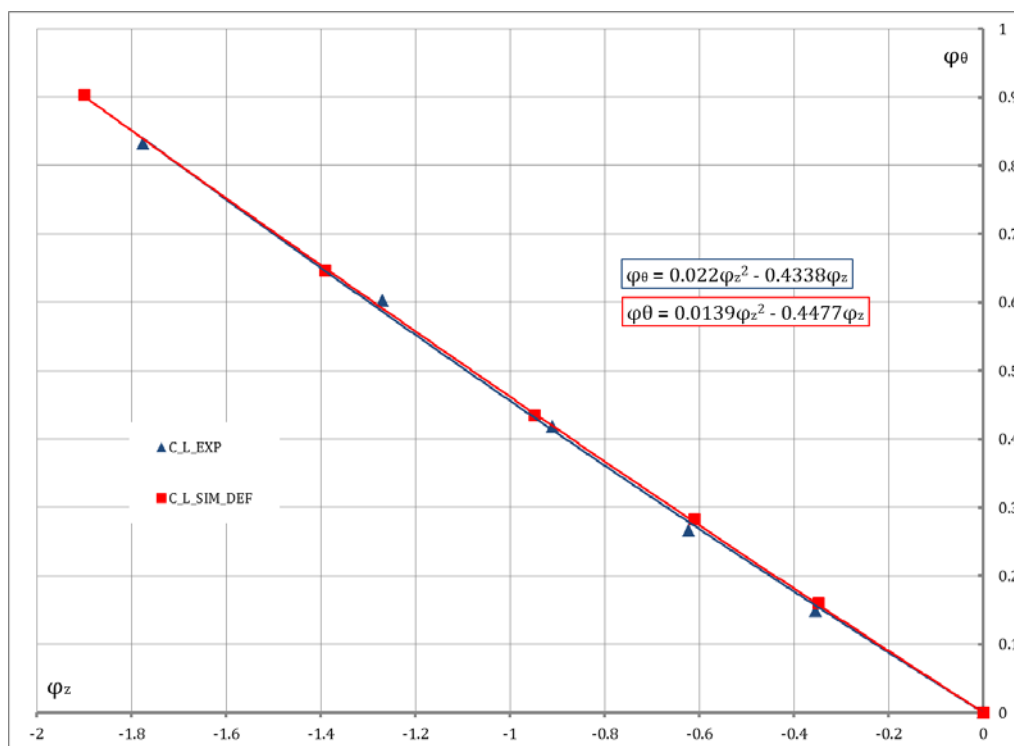
Slika 7.4 Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka R_L ostvarenih simulacijom i eksperimentalno

7.2 SABIJANJE UZORAKA GRUPE C_L RAVNIM ALATIMA

Dijagram promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata za grupu uzoraka C_L je prikazan na slici 7.5. Slika predstavlja uporedni prikaz deformacionih sila ostvarenih u simulaciji i eksperimentu.



Slika 7.5 Poređenje deformacione sile ostvarene MKE i eksperimentalnim putem za grupu uzoraka C_L

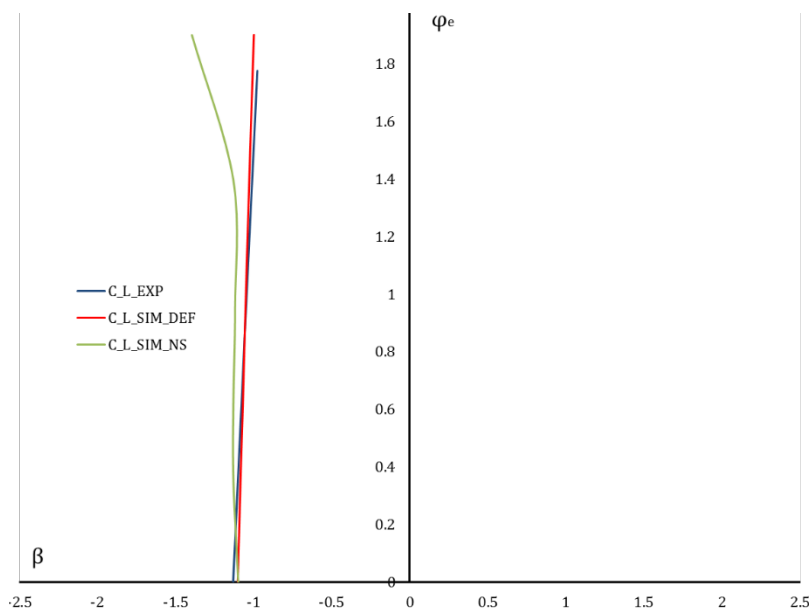


Slika 7.6 Odnos logaritamskih deformacija ostvarenih MKE i eksperimentom za grupu uzoraka C_L

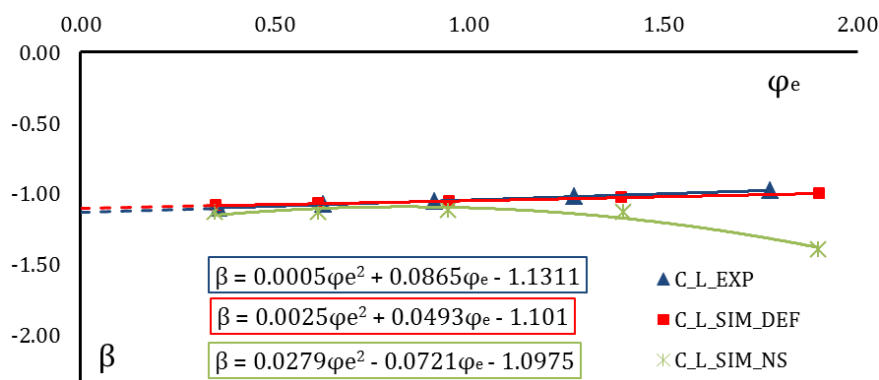
Uporedni prikaz rezultata deformabilnosti materijala ostvarenih eksperimentalno i numeričkom simulacijom

Na osnovu dijagrama prikazanog na slici 7.5 moguće je zaključiti da između rezultata ostvarenih u eksperimentu i simulaciji postoji dobro slaganje. U oblasti hoda alata između 2 i 10mm postoji mala razlika u vrednostima deformacione sile. Sila ostvarena u eksperimentu je veća za 5%, a razlog tome može ležati u uslovima obrade koji su se razlikovali od uslova u simulaciji.

Odnos logaritamskih deformacija ostvarenih u simulaciji i eksperimentu je prikazan na slici 7.6. Dijagram pokazuje izuzetnu sličnost između prikazanih odnosa logaritamskih deformacija. Uočava se da su vrednosti dve logaritamske deformacije na kraju procesa veće u slučaju simulacije nego eksperimenta.



Slika 7.7 Uporedni prikaz promene pokazatelja naponskog stanja β u zavisnosti od efektivne deformacije φ_e za grupu uzoraka C_L ostvaren u simulaciji i eksperimentu

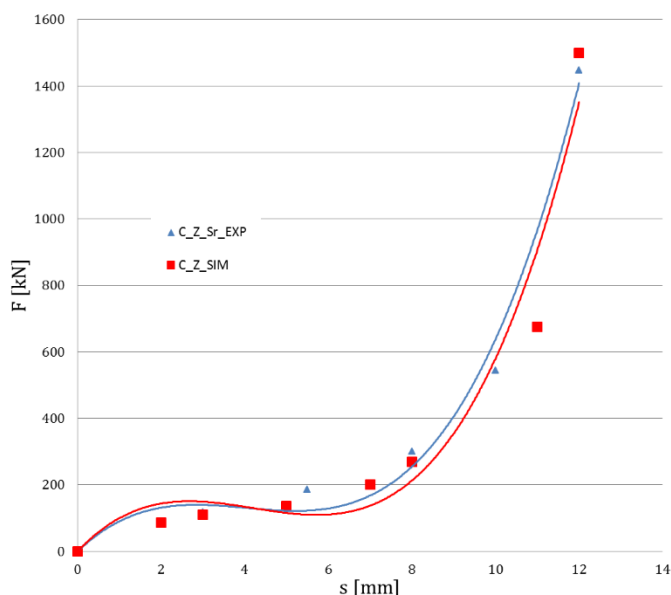


Slika 7.8 Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka C_L ostvarenih simulacijom i eksperimentalno

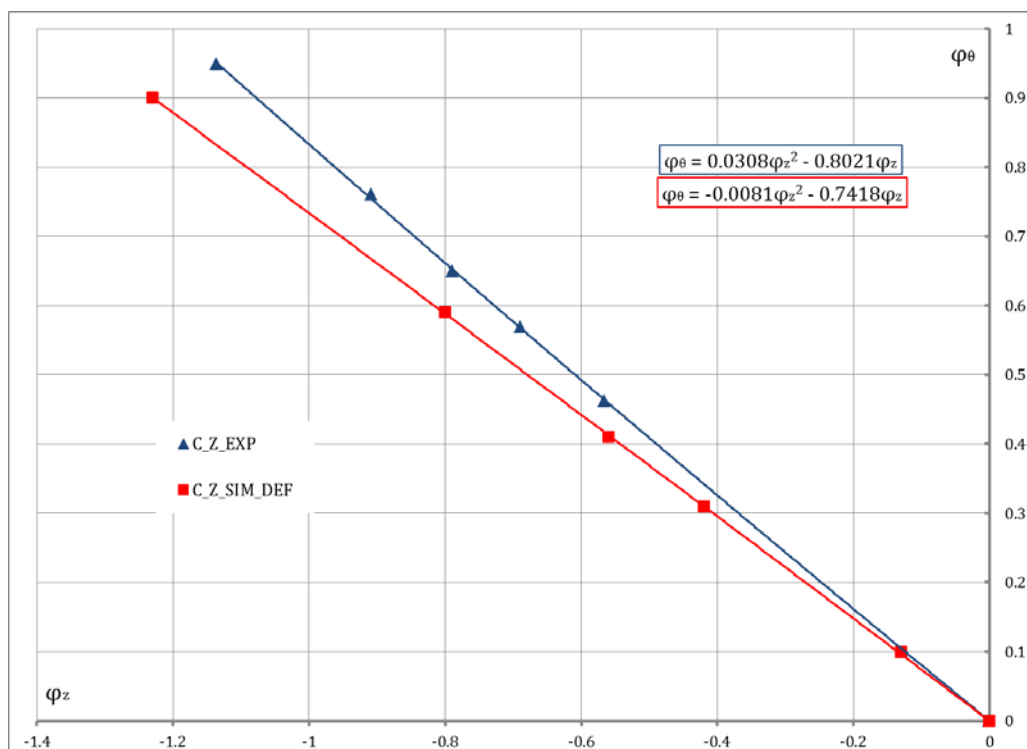
Dijagram na slici 7.7 predstavlja odnos pokazatelja naponskog stanja i efektivne deformacije za grupu uzoraka C_L ostvarenih u eksperimentu (C_L_EXP) i simulaciji na osnovu deformacionog stanja (C_L_SIM) i na osnovu naponskog stanja (C_L_SIM_NS). Istorija pokazatelja naponskog stanja je prikazana na slici 7.8.

7.3 SABIJANJE UZORAKA GRUPE C_Z RAVNIM ALATIMA

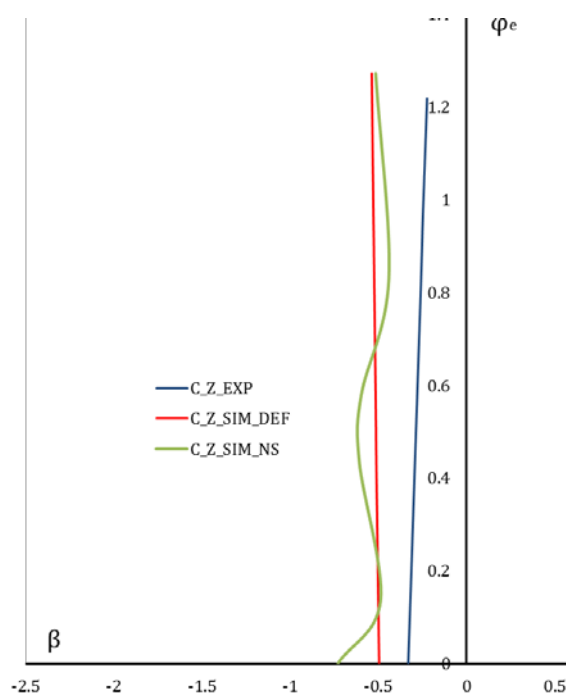
Uporedni prikaz promene deformacione sile u zavisnosti od hoda alata ostvarenih u simulaciji i eksperimentu za grupu uzoraka C_Z je dat na slici 7.9. Kao i u prethodnim slučajevima ostvarena je slična zavisnost sila – hod i u eksperimentalnoj i numeričkoj analizi.



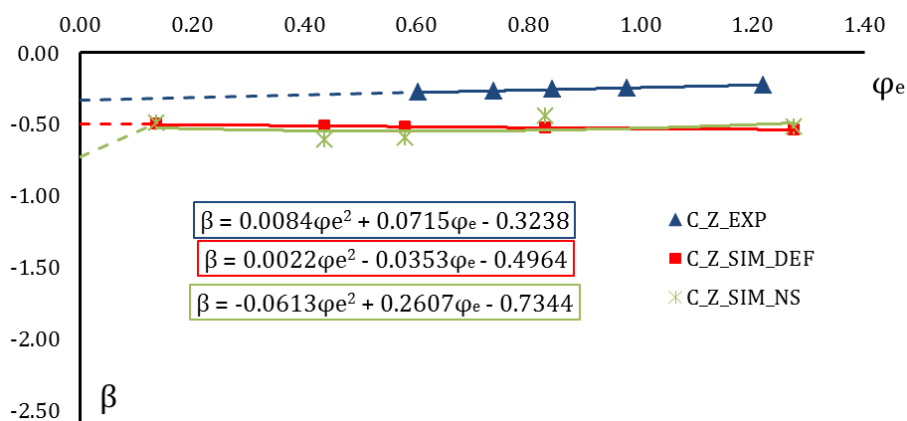
Slika 7.9 Poređenje deformacione sile ostvarene MKE i eksperimentalnim putem za grupu uzoraka C_Z



Slika 7.10 Odnos logaritamskih deformacija ostvarenih MKE i eksperimentom za grupu uzoraka C_Z



Slika 7.11 Uporedni prikaz promene pokazatelja naponskog stanja β u zavisnosti od efektivne deformacije φ_e za grupu uzoraka C_Z određenog simulacijom i eksperimentalno



Slika 7.12 Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka C_Z ostvarenih simulacijom i eksperimentalno

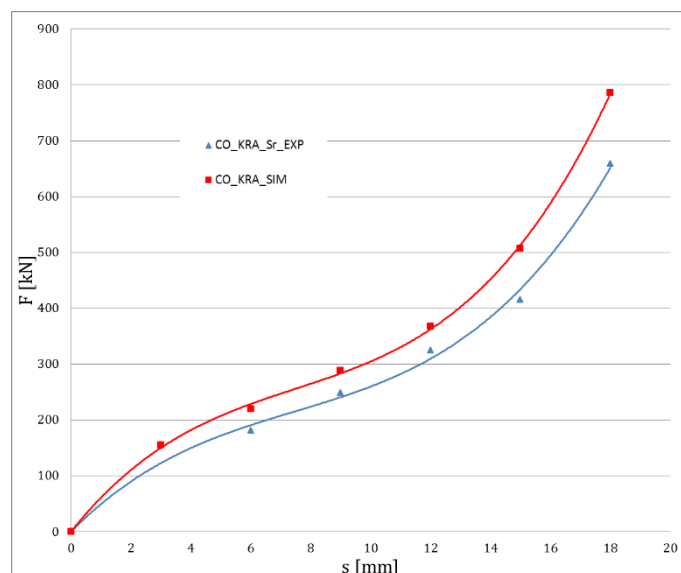
Odnos logaritamskih deformacija ostvarenih u simulaciji i eksperimentu je prikazan na slici 7.10. Dijagram prokazuje sličnost između prikazanih odnosa logaritamskih deformacija.

Na slici 7.11 je prikazana zavisnost pokazatelja naponskog stanja i efektivne deformacije za grupu uzoraka C_Z. I simulacija (C_Z_SIM) i eksperiment (C_Z_EXP) pokazuju da je pri sabijanju uzoraka grupe C_Z ostvareno monotono deformisanje. Međutim, pokazatelj naponskog stanja određen na osnovu naponskog kriterijuma (C_Z_SIM_NS) pokazuje da proces nije monoton.

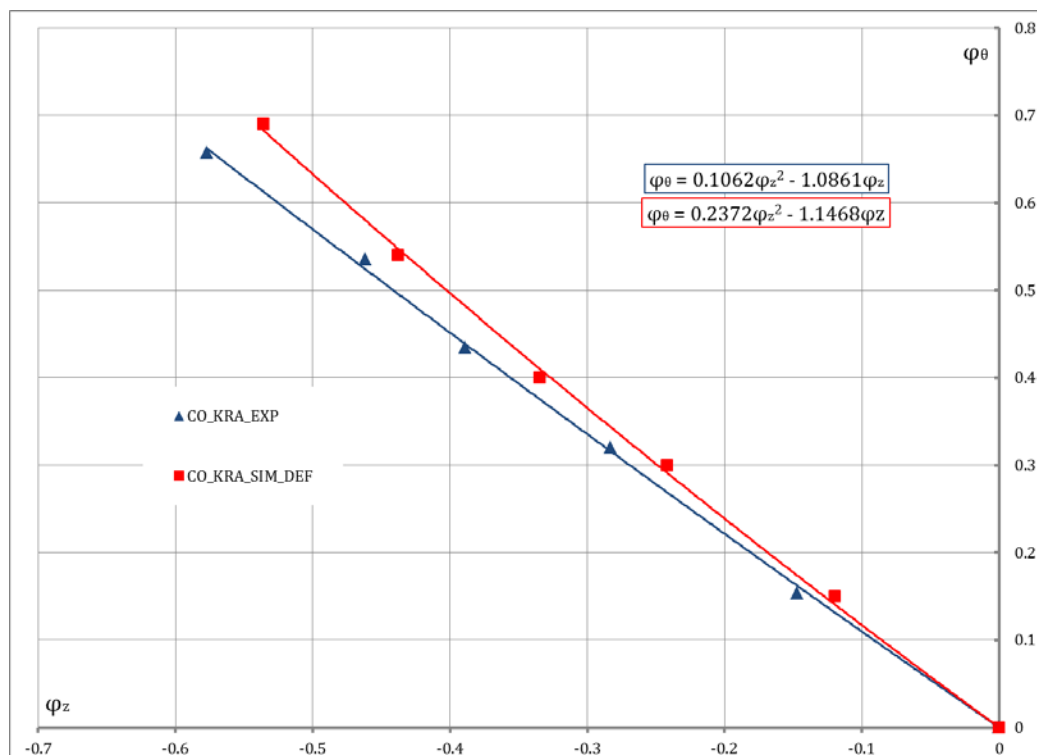
Na slici 7.12 se uočava da su tokovi istorija pokazatelja naponskog stanja ostvarenih u simulaciji (C_Z_SIM i C_Z_SIM_NS) ujednačeni, dok je u slučaju eksperimenta (C_Z_EXP) prisutan trend rasta deformacije ali za manje vrednosti pokazatelja naponskog stanja.

7.4 SABIJANJE UZORAKA GRUPE CO_KRA RAVNIM I KONUSNIM ALATIMA

Uporedni prikaz zavisnosti sile od hoda u procesu sabijanja uzoraka grupe CO_KRA je prikazan na slici 7.13. Uočava se da je sila ostvarena u simulaciji veća nego u eksperimentu. Potencijalni razlog tome mogu biti nejednaki uslovi trenja u toku procesa.



Slika 7.13 Poređenje deformacione sile ostvarene MKE i eksperimentalnim putem za grupu uzoraka CO_KRA



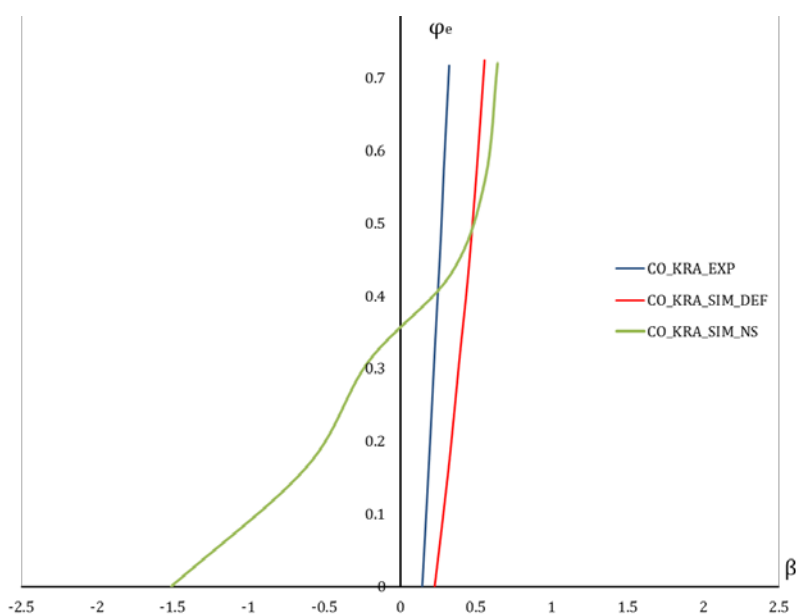
Slika 7.14 Odnos logaritamskih deformacija ostvarenih MKE i eksperimentom za grupu uzoraka CO_KRA

Uporedni prikaz rezultata deformabilnosti materijala ostvarenih eksperimentalno i numeričkom simulacijom

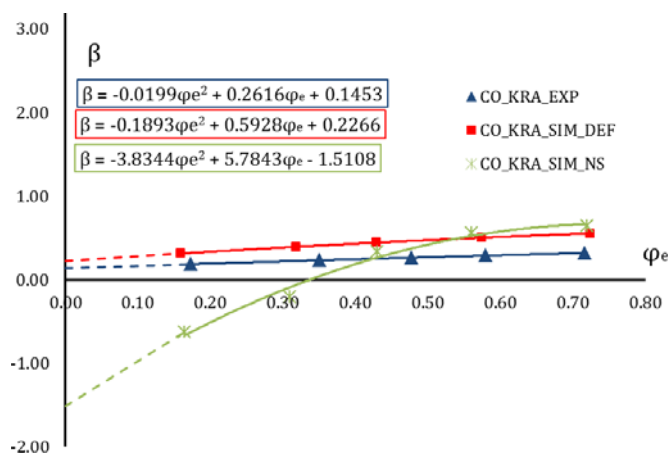
Odnos logaritamskih deformacija za ovu grupu uzoraka je prikazan na slici 7.14 i na njoj se uočava da je odnos logaritamskih deformacija približno isti i u slučaju eksperimentalne i numeričke analize.

Krive prikazane na slici 7.15 prikazuju odnos pokazatelja naponskog stanja u odnosu na efektivnu deformaciju. Za slučaj sabijanja uzoraka grupe CO_KRA, i u simulaciji i u eksperimentu prema CO_KRA_SIM i CO_KRA_EXP ostvaren je monoton proces deformisanja. Takođe, uočava se da je vrednost pokazatelja naponskog stanja veća u slučaju numeričke analize. Međutim, promena pokazatelja naponskog stanja određenog na osnovu naponskog pristupa (CO_KRA_SIM_NS) pokazuje da je proces potpuno nemonoton.

Na slici 7.16 je dat prikaz istorija pokazatelja naponskog stanja za slučaj sabijanja uzoraka grupe CO_KRA.



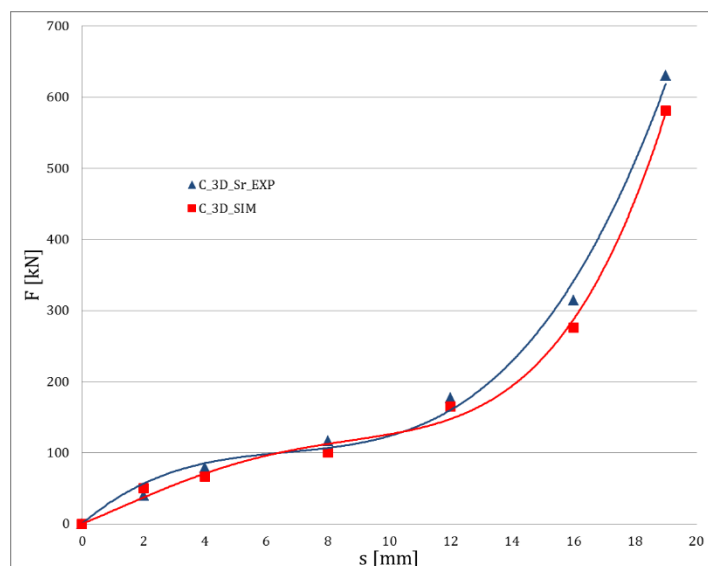
Slika 7.15 Uporedni prikaz promene pokazatelja naponskog stanja β u zavisnosti od efektivne deformacije φ_e za grupu uzoraka CO_KRA određenog simulacijom i eksperimentalno



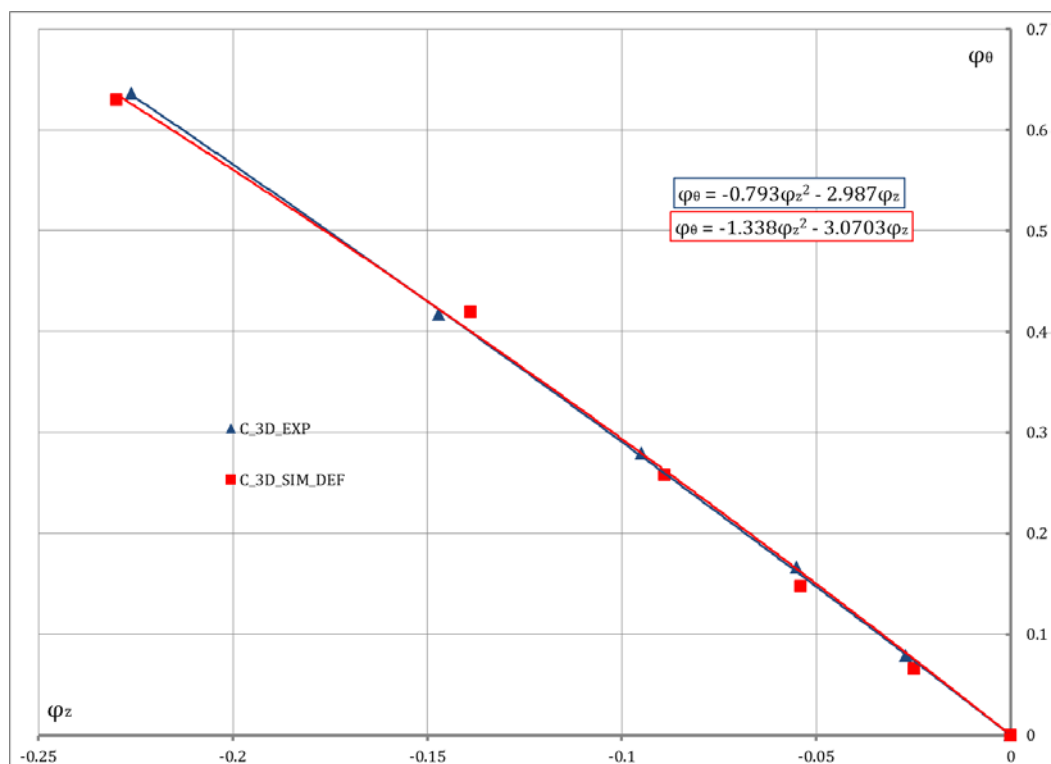
Slika 7.16 Istorijski prikaz pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka CO_KRA ostvarenih simulacijom i eksperimentalno

7.5 SABIJANJE UZORAKA GRUPE C_3D RAVNIM ALATIMA

U slučaju sabijanja uzoraka grupe C_3D zavisnost sila – hod je približno ista u oba slučaja, slika 7.17. Uočava se da je za istu vrednost hoda ostvarena 6% veća sila u eksperimentu nego u simulaciji.



Slika 7.17 Poređenje deformacione sile ostvarene MKE i eksperimentalnim putem za grupu uzoraka C_3D

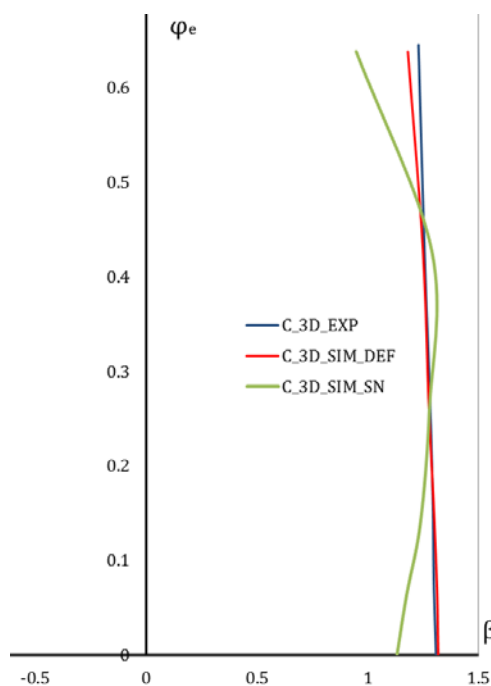


Slika 7.18 Odnos logaritamskih deformacija ostvarenih MKE i eksperimentom za grupu uzoraka C_3D

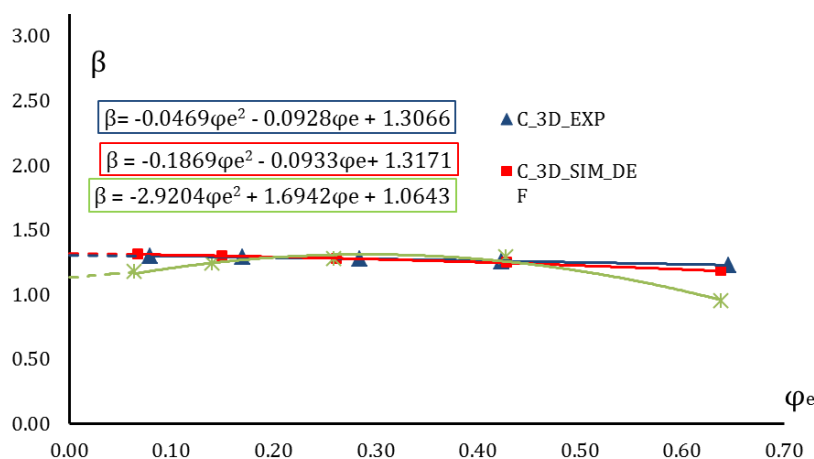
Uporedni prikaz rezultata deformabilnosti materijala ostvarenih eksperimentalno i numeričkom simulacijom

Krive koje opisuju zavisnost efektivnih deformacija u dva pravca se preklapaju, što znači da je deformaciono stanje u toku procesa isto i za simulaciju a i za eksperiment, slika 7.18.

Na slici 7.19 je prikazana zavisnost pokazatelja naponskog stanja i efektivne deformacije za grupu uzoraka CO_KRA. Moguće je zaključiti da simulacija (C_3D_SIM) i eksperiment (C_3D_EXP) pokazuju monotonost procesa pri sabijanju uzoraka grupe C_3D_KRA. Međutim, pokazatelj naponskog stanja određen na osnovu naponskog pristupa (C_3D_SIM_NS) pokazuje da proces nije monoton.



Slika 7.19 Uporedni prikaz promene pokazatelja naponskog stanja β u zavisnosti od efektivne deformacije φ_e za grupu uzoraka C_3D određenog simulacijom i eksperimentalno



Slika 7.20 Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka C_3D ostvarenih simulacijom i eksperimentalno

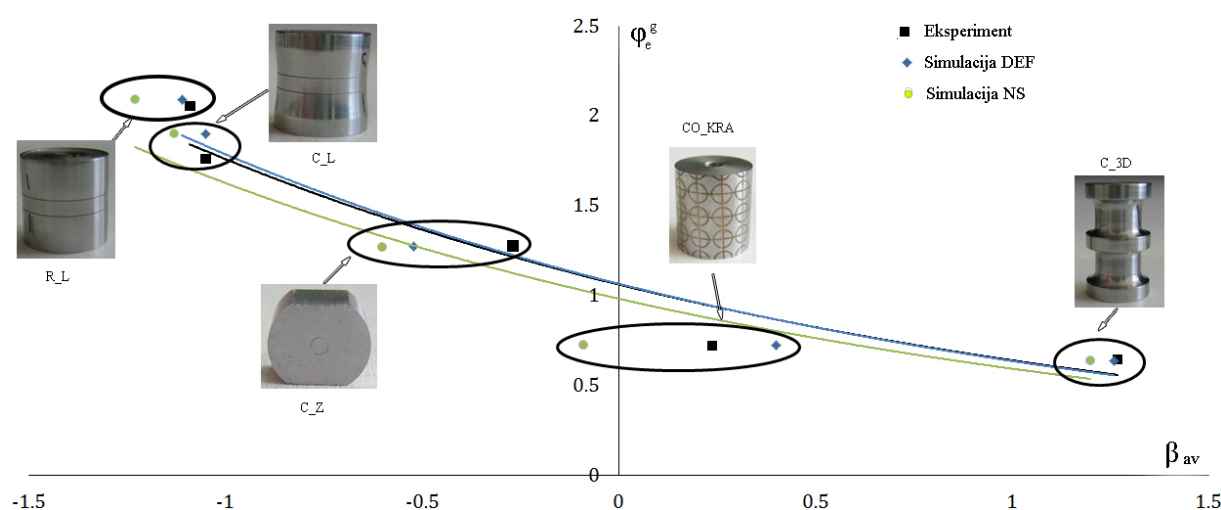
Dijagram na slici 7.20 predstavlja odnos pokazatelja naponskog stanja i efektivne deformacije za grupu uzoraka C_3D ostvarenih u eksperimentu (C_3D_EXP) i simulaciji na osnovu deformacionog stanja (C_3D_SIM) i na osnovu naponskog stanja (C_3D_SIM_NS). Uočava se da je u slučaju proračuna na osnovu deformacionog pristupa i u eksperimentu (C_3D_EXP) i u simulaciji (C_3D_SIM) ostvaren monoton proces deformisanja. S druge strane, proračun ostvaren na osnovu naponskog pristupa (C_3D_SIM_NS) pokazuje da je proces nemonoton.

7.6 POLOŽAJ MODELA DEFORMACIJE NA DIJAGRAMU GRANIČNE DEFORMABILNOSTI

Monotoni modeli deformisanja, prikazani u prethodnim poglavljima, su analizirani numeričkim putem u cilju provjere mogućnosti primene numeričke analize u svrhu definisanja dijagrama granične deformabilnosti. Kao i u slučaju eksperimentalnih istraživanja praćene su deformacije u toku procesa deformisanja, a srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja i granične efektivne deformacije za analizirane monotone modele deformisanja su izračunate metodologijom prikazanom u poglavlju 4.3 i ucrtane u prethodno eksperimentalno definisan dijagram granične deformabilnosti, slika 7.21.

Pored deformacionog pristupa izvršeno je i određivanje pokazatelja naponskog stanja na osnovu naponskog pristupa ali samo u simulacijama (metodologija prikazana u poglavlju 4.3). Srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja kao i granične deformacije za ispitivane modele su takođe unete u DGD, slika 7.21.

Posmatranjem dijagrama granične deformabilnosti na slici 7.21 moguće je zaključiti da u zavisnosti od modela uzorka postoji veće ili manje odstupanje rezultata. Odstupanje od eksperimentalnih rezultata je znatno veći u slučaju primene naponskog pristupa nego u slučaju primene deformacionog pristupa.



Slika 7.21 Položaj numerički analiziranih modela deformisanja na dijagramu granične deformabilnosti

8. DISKUSIJA REZULTATA

Istraživanja prikazana u disertaciji sprovedena su s ciljem pronalaženja monotonih procesa deformisanja koji se mogu primeniti za određivanje dijagrama granične deformabilnosti. Kako bi se ostvario postavljeni cilj, izvršeno je opsežno eksperimentalno i numeričko istraživanje. Rezultati prikazani u ovom poglavlju u potpunosti su u skladu s rezultatima prikazanim u prethodnim poglavljima.

8.1 UTICAJ GEOMETRIJE UZORKA I ALATA NA POKAZATELJ NAPONSKOG STANJA

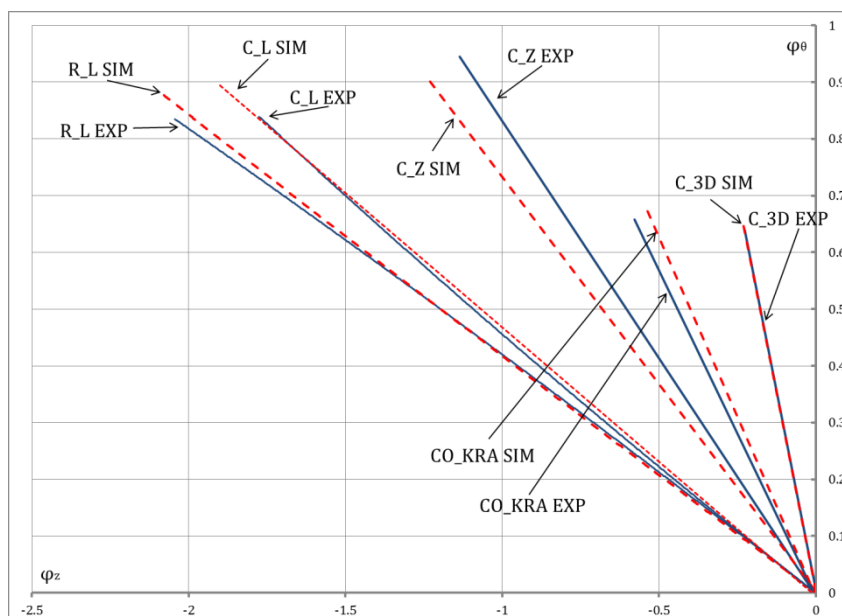
Kako je cilj ovog rada pronalaženje monotonih modela deformisanja, u nastavku je dat prikaz uticaja geometrije uzoraka na monotonost procesa. Analizom dostupne literature [5, 25, 26, 59, 65, 66] kao i rezultata dobijenih u prikazanim istraživanjima, može se zaključiti da geometrija uzorka u procesu sabijanja ima veliki uticaj na istoriju deformisanja. U tabeli 8.1 dat je prikaz modela deformisanja korišćenih u ovoj disertaciji (u početnoj i krajnjoj fazi).

Kako bi bilo moguće definisati pokazatelj naponskog stanja, metodologijom prikazanom u ovom radu, inicijalno je potrebno definisati odnos deformacija (φ_z i φ_θ) u kritičnim zonama deformisanja. Na slici 8.1 dat je prikaz puta deformacije za svih pet ispitivanih modela. Skup tačaka iste grupe uzoraka je aproksimiran polinomom drugog reda. Pri tome su korišćeni podaci dobijeni neposrednim merenjem u toku eksperimenta, odnosno očitavanjem iz simulacije. Posmatrajući posebno svaku grupu ispitivanih uzoraka, moguće je zaključiti da je put deformacija ostvarenih u eksperimentu i u simulaciji za grupe uzoraka R_L, C_L i C_3D približno isti. U slučaju grupe uzoraka C_Z i CO_KRA razlika u putu deformacije je primetna, ali je kao i u slučaju ostalih uzoraka zavisnost dve deformacije linearna. Takođe, iz dijagrama je moguće uočiti da se posmatrano od grupe uzoraka R_L prema grupi uzoraka C_3D ostvaruju sve manje vrednosti logaritamske deformacije u z pravcu.

Prilikom analize deformabilnosti materijala, pogodno je promenu pokazatelja naponskog stanja pratiti u zavisnosti od stepena deformacije (slika 8.2). Ako se posmatraju rezultati ostvareni u simulaciji i eksperimentu na osnovu deformacionog pristupa (_EXP i _SIM), može se zaključiti da je pokazatelj naponskog stanja za sve modele približno konstantan tokom procesa deformisanja.

Tabela 8.1 Sumarni prikaz korišćenih modela deformisanja

No	Model	Uzorak u nultoj i krajnjoj fazi deformisanja	
1	R_L		
2	C_L		
3	C_Z		
4	CO_KRA		
5	C_3D		

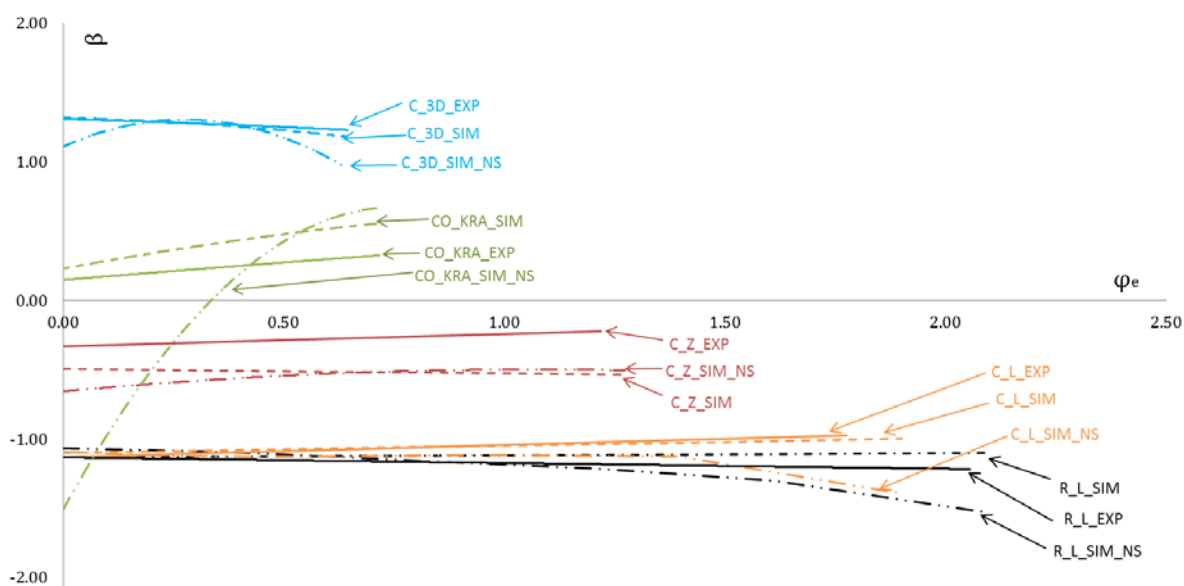


Slika 8.1 Put deformacije za ispitivane modele (eksperiment i simulacija)

Takođe, za uzorke grupe R_L, C_L i C_3D vrednosti pokazatelja naponskog stanja su približno iste u eksperimentu i simulaciji. Za uzorke grupe CO_KRA vrednosti pokazatelja naponskog stanja su u proseku 30% veće u simulaciji nego u eksperimentu. Primena sličnog modela deformisanja se može pronaći u radu [45]. Autor je u svojoj magistarskoj tezi vršio ispitivanje sabijanja cilindričnih uzoraka udubljenim i konusnim alatima. Za ovaj model sabijanja autor je ispitivanja izvršio na 3 uzorka, a jedan od izlaznih rezultata prikazanih u magistarskoj tezi je istorija pokazatelja naponskog stanja. Ono što se može uočiti je da su za tri ispitivana uzorka ostvarene tri različite istorije pokazatelja naponskog stanja. U jednom slučaju proces je bio potpuno monoton, u drugom približno monoton dok je u trećem slučaju proces bio potpuno nemonoton.

Kod uzoraka grupe C_Z vrednosti pokazatelja naponskog stanja su u proseku za 40% veće u eksperimentu nego u simulaciji. Modeli slični ovom su ispitivani u [66].

S druge strane, naponski pristup daje drugačiju sliku. Svi modeli deformisanja su prema naponskom pristupu nemonotoni, odnosno vrednost pokazatelja naponskog stanja za sve modele nije konstantna tokom procesa (slika 8.2, *_SIM_NS*). Najizraženija razlika između deformacionog i naponskog pristupa je prisutna kod modela CO_KRA kod kog istorija deformisanja kreće iz negativne oblasti a završava se u pozitivnoj. Prema naponskom pristupu kod ovog modela se iz pritisnog naponskog stanja prelazi u zatezno. Pojedinačni prikaz istorije deformisanja za sve modele je prikazan u nastavku.

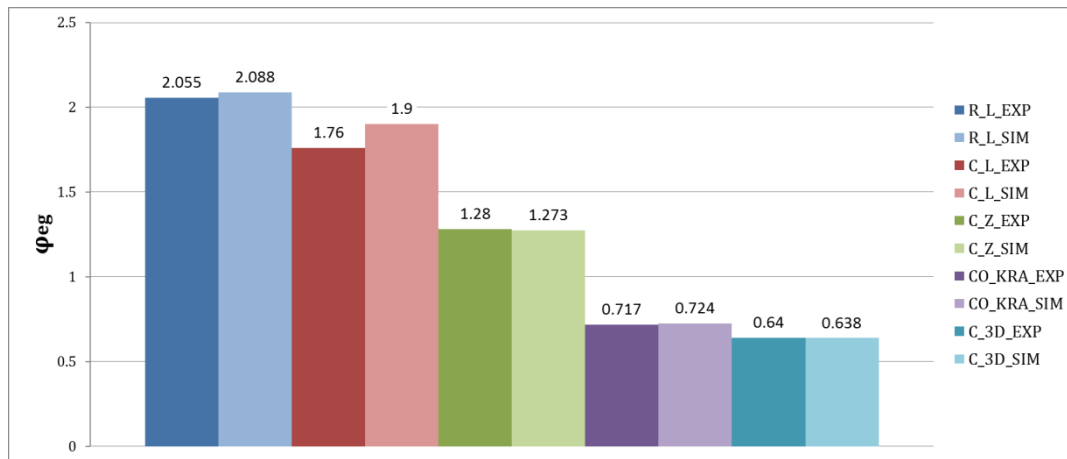


Slika 8.2 Istorija deformisanja za sve ispitivane grupe uzoraka (eksperiment i simulacija)

Na slici 8.3 dat je grafički prikaz vrednosti graničnih deformacija za sve modele deformisanja (eksperiment i simulacija). Vrednosti granične deformacije ostvarene u simulaciji na osnovu deformacionog i naponskog pristupa su iste, pa vrednosti za *_SIM_NS* nisu posebno predstavljene.

Ovakav pristup istraživanja deformabilnosti materijala se može pronaći u radovima [25, 26, 37, 45, 54, 62, 63, 64, 66, 70, 72].

S obzirom na to da su u radu istraživani monotoni modeli deformisanja na uzorcima izrađenim od jedne vrste materijala (C45E), jasno se može zaključiti da geometrija uzorka ima najveći uticaj na promenu vrednosti pokazatelja naponskog stanja. Modeli istraživani eksperimentalno i numerički su kreirani s ciljem ostvarivanja monotonog procesa deformisanja, kako bi se prikupilo dovoljno podataka za definisanje dijagrama granične deformabilnosti.



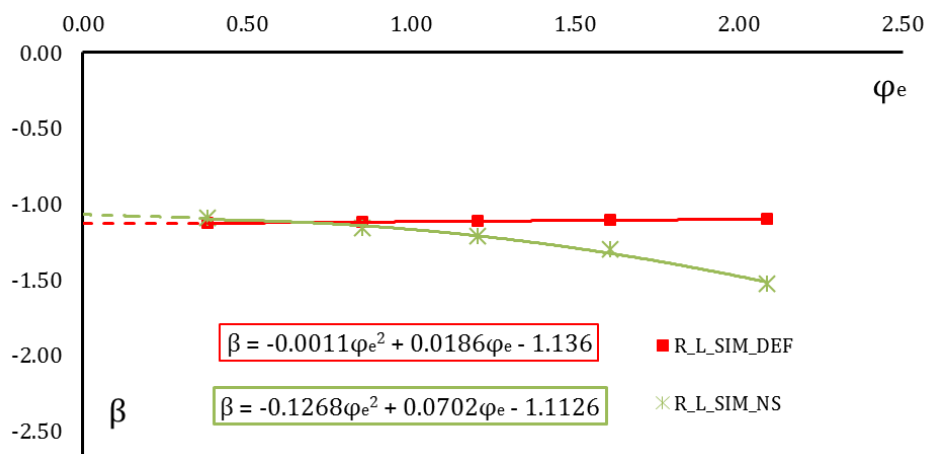
Slika 8.3 Vrednosti graničnih deformacija za ispitivane modele deformisanja

8.2 PRIMENA SIMULACIJA ZA ODREĐIVANJE ISTORIJE DEFORMISANJA

U ovom poglavlju izvršena je uporedna analiza rezultata deformabilnosti materijala dobijenih numeričkim simulacijama na dva načina.

Prvi način je zasnovan na analizi naponsko-deformacionog stanja u kritičnoj zoni uzorka (deformacioni pristup, poglavlje 4.3), dok je drugi način zasnovan na direktnom izračunavanju β – faktora na osnovu prethodno određenih komponenti napona (naponski pristup, poglavlje 4.3).

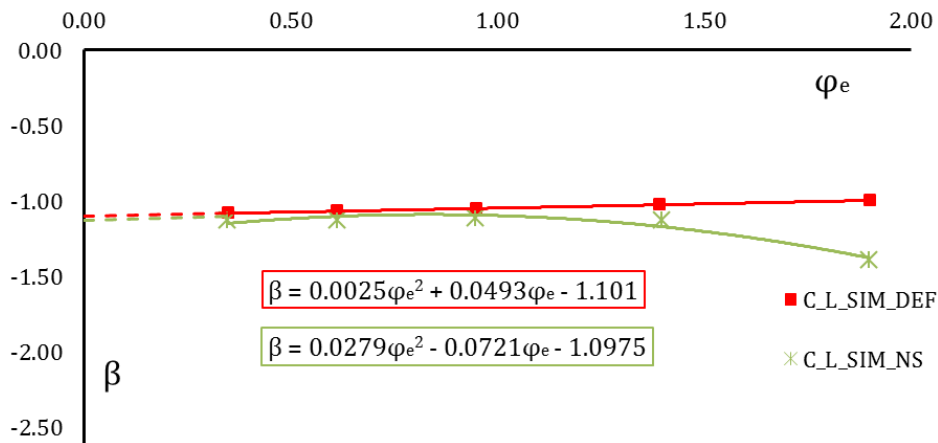
Distribucija komponenti napona σ_x , σ_z i σ_e po fazama deformisanja je detaljno prikazana u poglavlju 7. Kroz ovo poglavlje prikazana je istorija pokazatelja naponskog stanja za ispitivane modele, u slučaju dva načina određivanja pokazatelja naponskog stanja.



Slika 8.4 Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzorka R_L

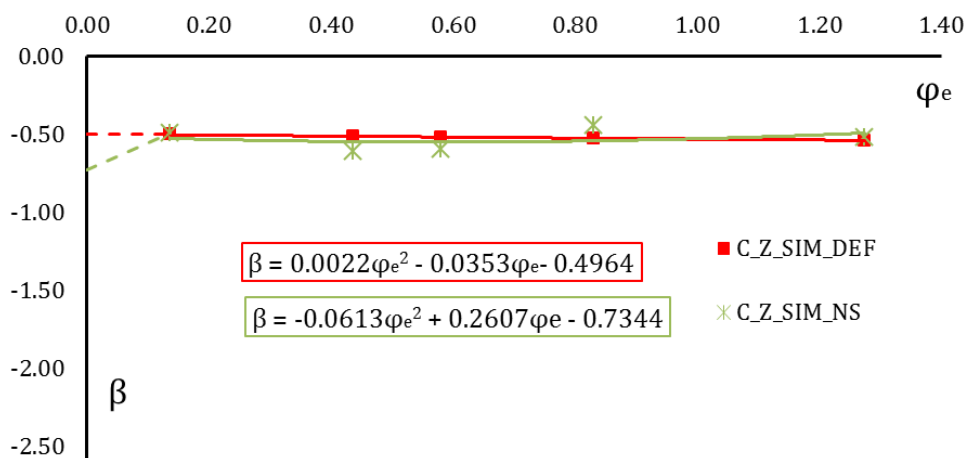
Na slici 8.4 prikazana je istorija pokazatelja naponskog stanja za uzorke grupe R_L. Posmatranjem slike 8.4 uočava se da je za ovaj model deformisanja prisutno odstupanje u rezultatima. Naime, simulacija procesa deformisanja na osnovu deformacionog stanja (R_L_SIM) pokazuje da je proces monoton, dok je u slučaju definisanja pokazatelja naponskog stanja na osnovu naponskog stanja (R_L_SIM_NS) proces potpuno nemonoton.

Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka C_L prikazana je na slici 8.5. Kao i kod prethodnog modela, proces deformisanja je nemonoton u slučaju naponskog pristupa, dok je u slučaju deformacionog kriterijuma proces deformisanja monoton.

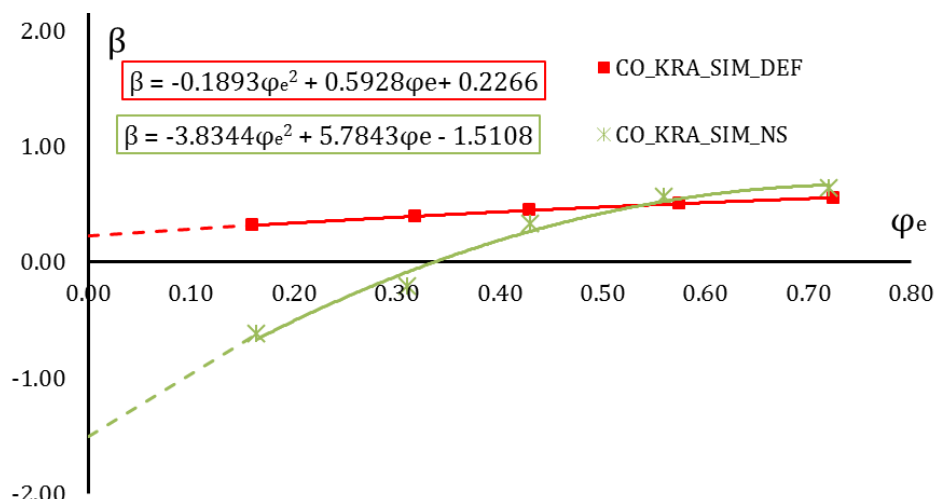


Slika 8.5 Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka C_L

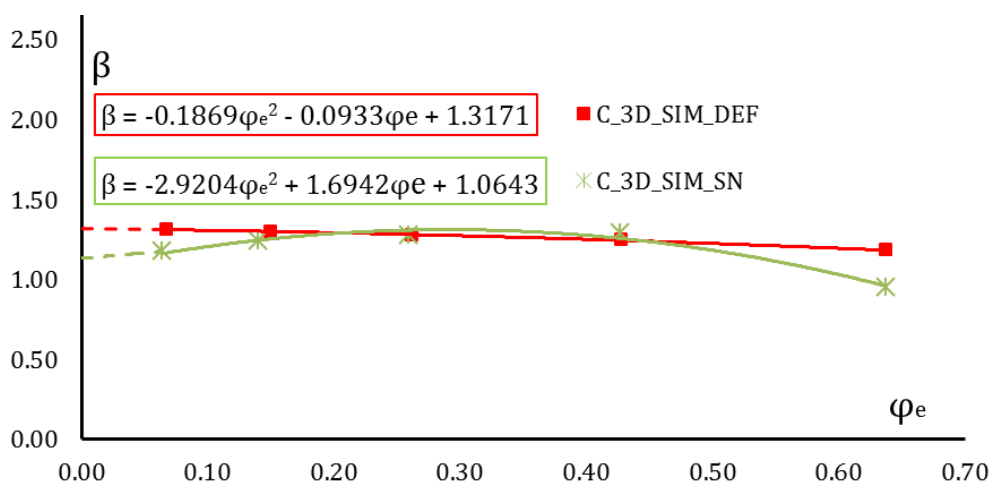
U slučaju modela C_Z, ako se posmatra aproksimacija istorije deformisanja polinomom drugog reda, može se doneti zaključak da je podudarnost dve metodologije velika, slika 8.6. Međutim, na slici se može uočiti da se vrednost pokazatelja naponskog stanja u toku deformisanja menja (metodologija određivanja prema naponskom stanju) dok se u drugom slučaju (određivanje pokazatelja naponskog stanja na osnovu deformacionog stanja) vrednost pokazatelja naponskog stanja ne menja u toku procesa deformisanja. Takođe, prema proračunu, pri vrednosti deformacija 0, pokazatelj naponskog stanja je približno 50% manji u slučaju naponskog koncepta.



Slika 8.6 Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka C_Z



Slika 8.7 Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka CO_KRA



Slika 8.8 Istorija pokazatelja naponskog stanja za grupu uzoraka C_3D

Grupa uzoraka CO_KRA pokazuje najveću nepodudarnost dva pristupa (slika 8.7). Metodologija određivanja pokazatelja naponskog stanja na osnovu naponskog stanja pokazuje potpunu nemonotonost procesa, dok su vrednosti pokazatelja naponskog stanja na osnovu deformacionog pristupa približno iste u toku procesa deformisanja.

U slučaju grupe uzoraka C_3D (slika 8.8) primećuje se da je u toku deformisanja prisutna razlika u vrednostima pokazatelja naponskog stanja, određenih na osnovu deformacionog i naponskog pristupa.









8.3 DIJAGRAM GRANIČNE DEFORMABILNOSTI ZA ČELIK C45E

Dijagram granične deformabilnosti definisan u ovom radu, prema prikazanoj metodologiji, određen je povezivanjem graničnih deformacija s pokazateljem naponskog stanja određenim u kritičnoj zoni deformisanja. Za njegovo određivanje primenjeni su novi, monotoni modeli deformisanja (R_L; C_L; C_Z; CO_KRA; C_3D). U tabeli 8.2 dat je sumarni prikaz deformabilnosti

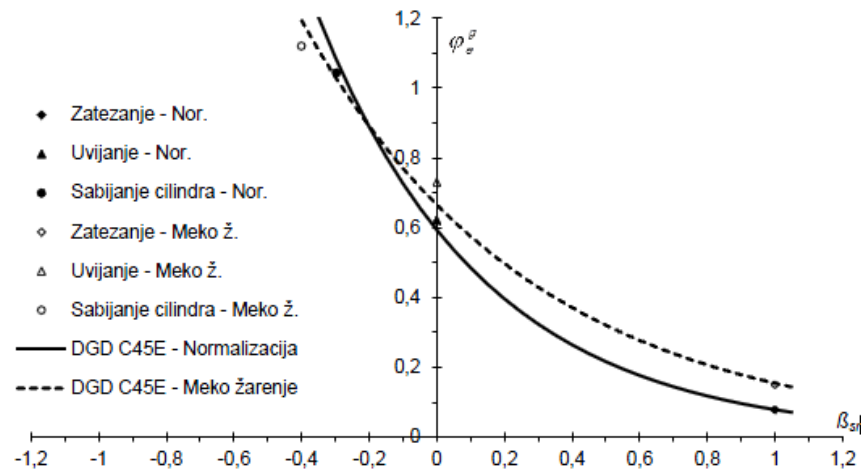
čelika C45E u meko žarenom stanju sa stanovišta granične deformacije i srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja.

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 8.2 definisan je konačan oblik krive granične deformacije (β_{sr} i φ_{e^g}). U poglavlju 5 dat je prikaz dijagrama granične deformabilnosti konstruisanog na osnovu eksperimentalnih rezultata, s prikazom položaja modela na osnovu numeričke analize. Na slici 8.10 prikazana je kriva granične deformacije koja obuhvata eksperimentalne i numeričke rezultate. Sve tri krive su aproksimirane eksponencijalnom zavisnošću oblika $\varphi_{eg}=A \cdot e^{B \cdot \beta_{sr}}$.

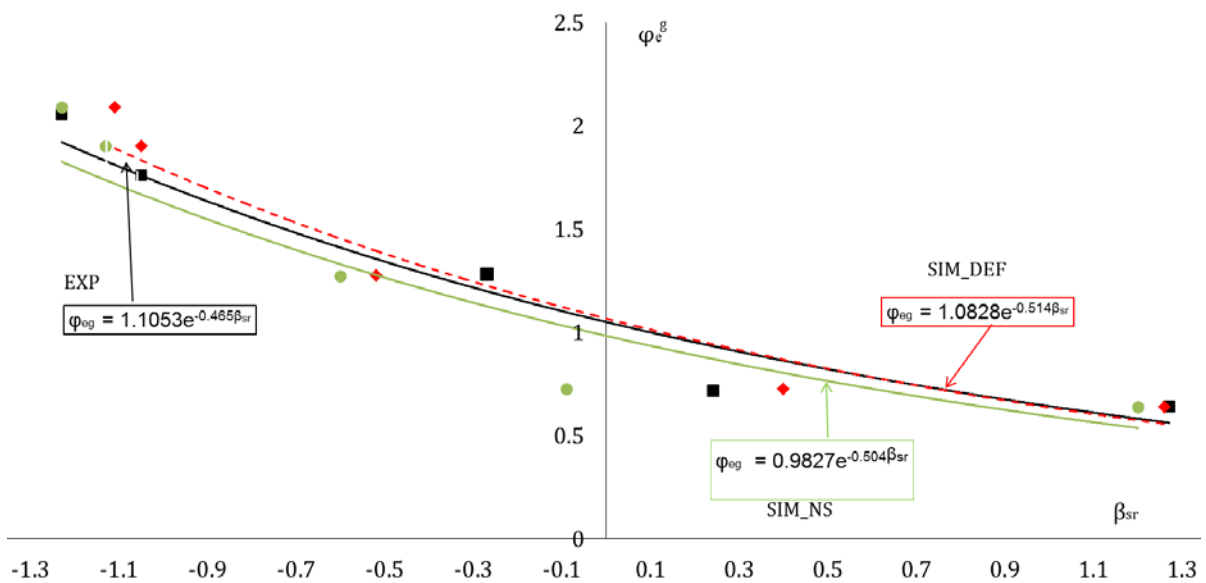
Tabela 8.2 Prikaz rezultata deformabilnosti za čelik C45E

No	Model	Uzorak u nultoj i krajnjoj fazi deformisanja		Analiza	β_{sr}	φ_{e^g}
1	R_L			EXP	-1,23	2,05
				SIM_DEF	-1,11	2,08
				SIM_NS	-1,23	2,08
2	C_L			EXP	-1,05	1,76
				SIM_DEF	-1,05	1,9
				SIM_NS	-1,13	1,9
3	C_Z			EXP	-0,27	1,26
				SIM_DEF	-0,52	1,27
				SIM_NS	-0,6	1,27
4	CO_KRA			EXP	0,24	0,71
				SIM_DEF	0,4	0,72
				SIM_NS	-0,09	0,72
5	C_3D			EXP	1,27	0,64
				SIM_DEF	1,26	0,64
				SIM_NS	1,2	0,64

Posmatrajući dijagram na slici 8.10 moguće je zaključiti da je položaj krivih određenih simulacijom (deformacioni pristup) i eksperimentom približno isti. Takođe, moguće je zaključiti da su u oblasti pritiskog naponskog stanja veće vrednosti efektivne deformacije ostvarene u simulaciji procesa deformisanja.



Slika 8.9 Dijagram granične deformabilnosti (eksperiment i simulacija) [37]



Slika 8.10 Dijagram granične deformabilnosti (eksperiment i simulacija)

Kriva granične deformabilnosti dobijena simulacijom (naponski pristup) se ne poklapa s krivom dobijenom eksperimentom. U ovom slučaju vrednosti pokazatelja naponskog stanja su za sve modele pomerene u smeru negativnih vrednosti pokazatelja naponskog stanja.

Ako se izvrši uporedna analiza DGD-a definisanog monotonim procesima deformisanja i dijagrama određenog u radu [37], za čelik C45E u meko žarenom stanju (slika 8.9), može se zaključiti da je oblast definisanosti β faktora značajno proširena, kako u oblasti pritiskog (negativnog) tako i u oblasti zateznog (pozitivnog) naponskog stanja.

Metodologija određivanja dijagrama granične deformabilnosti u osnovi podrazumeva primenu monotonih modela deformisanja. Kako krajnja vrednost pokazatelja naponskog stanja kod nemonotonih procesa deformisanja nije adekvatna za definisanje tačke na DGD-u, uveden je pojam srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja [60]. U disertaciji je za 5 modela deformisanja definisana istorija pokazatelja naponskog stanja, čime je potvrđena njihova monotonost, a zatim je definisan dijagram granične deformabilnosti primenom istih modela.

9. ZAKLJUČAK

Istraživanja prikazana u ovoj disertaciji izvedena su s ciljem pronalaženja monotonih modela deformisanja koji su iskorišćeni za definisanje dijagrama granične deformabilnosti, za materijal C45E u meko žarenom stanju. Proračun srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja i granične deformacije izvršen je na osnovu deformacionog i naponskog pristupa u kritičnoj zoni uzorka (zona pojave pukotine).

Na osnovu rezultata eksperimentalnih istraživanja i numeričkih simulacija može se zaključiti sledeće:

- Kod ispitivanih modela deformisanja prikazanih u disertaciji prisutno je dobro slaganje eksperimentalnih rezultata po serijama ispitivanih uzoraka. Ova konstatacija se odnosi kako na odnos deformacija u aksijalnoj i tangencijalnoj ravni tako i na promenu pokazatelja naponskog stanja u zavisnosti od efektivne deformacije, odnosno istoriju deformisanja.
- Srednja vrednost pokazatelja naponskog stanja i granične deformacije u procesu sabijanja uzoraka grupe R_L nalaze se u oblasti pritisnog naponskog stanja. Ovaj model sabijanja pokazuje da se u toku procesa deformisanja vrednost pokazatelja naponskog stanja ne menja i iznosi -1,09 pri graničnoj deformaciji 2,05. Takođe, prisutno je i dobro podudaranje eksperimentalnih i numeričkih rezultata određenih na osnovu deformacionog pristupa u kritičnoj zoni uzorka.
- Model deformisanja C_L predstavlja model kod kog je vrednost pokazatelja naponskog stanja u toku deformisanja konstantna i za uslove deformisanja prikazane u ovoj disertaciji iznosi -1,05 pri graničnoj deformaciji 1,76. Kao i u prethodnom slučaju prisutno je dobro slaganje eksperimentalnih i numeričkih rezultata ostvarenih na osnovu deformacionog stanja u kritičnoj zoni uzorka.
- Kod modela sabijanja C_Z, zbog neravnomerne deformacije na čelu uzorka nije prisutno potpuno monotono deformisanje, ali se ipak može smatrati da je pokazatelj naponskog stanja približno konstantan. Takođe, kod ovog modela sabijanja prisutno je odstupanje eksperimentalnih i numeričkih rezultata sa stanovišta pokazatelja naponskog stanja (deformacioni pristup).

- Model deformisanja CO_KRA je u odnosu na ostale modele specifičan po tome što je sabijanje vršeno ravnim i konusnim alatom. Kao i u prethodnom slučaju proces nije potpuno monoton, ali se može smatrati da je pokazatelj naponskog stanja približno konstantan.
- Poslednji model na kom su vršena istraživanja u disertaciji je model C_3D. Kod ovog modela ostvareno je zatezno naponsko stanje, a proces deformisanja je monoton. Pokazatelj naponskog stanja ostvaren za ovaj model deformisanja dostiže vrednost 1,27 pri graničnoj deformaciji od 0,64. I kod ovog modela deformisanja ostvareno je dobro podudaranje eksperimentalnih i numeričkih rezultata pokazatelja naponskog stanja i granične deformacije u slučaju određivanja istih na osnovu deformacionog pristupa.
- Srednje vrednosti pokazatelja naponskog stanja i granične deformacije za svih 5 modela deformisanja omogućile su preciznije određivanje dijagrama granične deformabilnosti u vrlo širokoj zoni β faktora ($-1,09 \leq \beta \leq 1,27$).
- Srednja vrednost pokazatelja naponskog stanja i granične deformacije određene metodom konačnih elemenata u velikoj meri se razlikuju kada je u pitanju njihovo definisanje na osnovu deformacionog i na osnovu naponskog pristupa. Istraživanja prikazana u disertaciji su pokazala da korišćenje simulacija procesa deformisanja za određivanje β_{sr} i φ_{e^g} daje različite rezultate primenom dve metodologije. S obzirom na to da su rezultati numeričke analize pokazatelja naponskog stanja na osnovu deformacionog stanja potvrđeni eksperimentalnim istraživanjima, može se izvesti zaključak da je sama pozadina proračuna naponskog stanja u Simufact.Forming softveru nedovoljno razvijena. Međutim, da bi ova konstatacija bila potpuno dokazana potrebno je izvršiti dodatna ispitivanja.
- Eksperimentalno-numerički rezultati identifikacije naponskog stanja na slobodnoj površini ispitivanih modela deformisanja pokazuju da polazni oblik i dimenzije uzoraka direktno utiču na uslove u kojima se odvija proces sabijanja. Naime, u zavisnosti od geometrije uzoraka ostvaruju se različite vrednosti pokazatelja naponskog stanja kao i granične deformacije.
- Ukupni rezultati istraživanja nedvosmisleno potvrđuju hipotezu da oblik i geometrija uzoraka i alata direktno utiču na mogućnost ostvarivanja monotonih procesa deformisanja pri hladnom zapreminskom oblikovanju.

10. NAUČNI DOPRINOS I MOGUĆNOST PRIMENE REZULTATA U PRAKSI

Naučni doprinos postignut istraživanjima prikazanim u disertaciji predstavlja razvoj metodologije za identifikaciju monotonih procesa deformisanja, kao i primenu monotonih procesa deformisanja za određivanje dijagrama granične deformabilnosti.

Monotoni modeli deformisanja razvijeni u ovoj disertaciji mogu se koristiti kao standardni, etalon, uzorci za definisanje dijagrama granične deformabilnosti za različite materijale. Samim tim, pored naučnog doprinosa, razvoj monotonih modela deformisanja ima i praktičnu primenu usmerenu ka pojednostavljivanju metodologije određivanja dijagrama granične deformabilnosti. Poznavanjem naponskog stanja bilo kog procesa zapreminskog deformisanja i dijagrama granične deformabilnosti moguće je predvideti maksimalnu deformaciju pre oštećenja strukture. Adekvatnim predviđanjem pojave oštećenja strukture materijala moguće je projektovati optimalni obradni sistem koji će dovesti do maksimalnog korišćenja potencijala materijala, odnosno, koji može uticati na veličinu ostvarene plastične deformacije. Na ovaj način, preciznijim definisanjem broja operacija obrade bilo kog procesa zapreminskog deformisanja, direktno se utiče na smanjenje cene izrade gotovog proizvoda.

11. LITERATURA

- [1] Abdel-Rahman M, El-Sheikh MN (1995). Workability in forging of powder metallurgy compacts. *Journal of Materials Processing Technology* 54: 97–102.
- [2] Aero EL (2000). Non-linear theory of elastic microshar in periodic structures. Instability of homogenous deformation. *J. Appl. Maths Mechs Vol* 64: 651–658.
- [3] Alexandrov S, Chikanova N, Vilotić D (1997). Compression of a block between cylindrical dies and its application to the workability diagram. *Studies in Applied Mechanics Vol* 45: 247–256.
- [4] Александров С, Вилотич Д (2006). Экспериментально-теоретическое определение диаграммы пластичности. *Журнал "Проблемы машиностроения и надежности машин* 5: 31 - 36.
- [5] Alexandrov S, Vilotić D, Konjović Z, Vilotić M (2013). An Improved Experimental Method for Determining the Workability Diagram. *Experimental Mechanics* 53: 699–711.
- [6] Altan T, Ngaile G, Shen G (2005). *Cold and Hot Forging, Fundamentals and Applications*. ASM International.
- [7] Atkins AG (1996). Fracture in forming. *Journal of Material Processing Technology* 56: 609–618.
- [8] Avizur B (1968). *Metal Forming: Process and analysis*.
- [9] Bao Z, Wierzbicki T (2014). On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. *International Journal of Mechanical Sciences* 46: 81–98.
- [10] Bao Z, Wierzbicki T (2005). On the cut-off value of negative triaxiality for fracture. *Engineering Fracture Mechanics* 72: 1049–1069.
- [11] Breuer D (2007). *Bestimmung des Formänderungsvermögens bei der Kaltmassivumformung*. Doktors Dissertation. Technischen Hochschule Aachen.
- [12] Bruschi S, Altan T, Banadic D, Bariani PF, Brosius A, et al (2014). Testing and modelling of material behaviour and formability insheet metal forming. *CIRP Annals–Manufacturing Technology* 63: 727–749.

-
- [13] Chen Y, Clausen AH, Hopperstad OS, Langseth M (2009). Stress-strain behaviour of aluminium alloys at a wide range of strain rates. *International Journal of Solids and Structures* 64: 3825–3835.
- [14] Chiantoni G, Bonora N, Ruggiero A (2010). Experimental study of the effect of triaxiality ratio on the formability limit diagram and ductile damage evolution in steel and high purity copper. *Int. J. Mater. Form.* 3: 171–174.
- [15] Devedžić B (1975). *Osnovi teorije plastičnog deformisanja metala*.
- [16] Dieter GE, Kuhn HA, Semiatin SL (2003). *Handbook of Workability and Process Design*. ASM International.
- [17] Su F, Chen ZC, Tsao CYA (2004). Workability of spray-formed 7075 Al alloy reinforced with SiCp at elevated temperatures. *Materials Science and Engineering A364*: 296–304.
- [18] Gäsner HP (2001). Free-surface ductility in bulk forming processes. *International Journal of Plasticity* 17: 755–772.
- [19] Gouveia BPPA, Rodrigues JMC, Martins PAF (1996). Fracture predicting in bulk metal forming. *Int. J. MEch. Sci.* 38: 361–372.
- [20] Gouveia BPPA, Rodrigues JMC, Martins PAF (2000). Ductile fracture in metalworking: experimental and theoretical research. *Journal of Materials Processing Technology* 101: 52–63.
- [21] Goronostajski Z, Jaskiewicz K (2005). Influence of deformation sequence of monotonic tests on behaviour of CuSi3.5 bronze. *Journal of Materials Processing Technology* 162–163: 304–311.
- [22] Gusel L, Rudolf R, Brezocnik M (2006). An experimental research of formability of cold formed material. 5th International DAAAM Baltic Conference, Tallin, Estonia.
- [23] Hartley P, Vilotić D, Plančak M (2005). Formability maps in cold forming with conical dies. *Proceedings of the 8th ESAFORM Conference on Material Forming, Cluj-Napoca, Romania*, 527-530.
- [24] Hosford W, Caddell R (2011): *Metal forming, mechanics and metallurgy*. Cambridge University press.
- [25] Ivanišević A, Milutinović M, Skakun P, Movrin D, Kačmarčik I, Plančak M, Vilotić D, Alexandrov S (2012). Experimental determination of forming limit diagram for brass. 11th International Scientific Conference: 435–438.
- [26] Ivanišević A, Kačmarčik I, Movrin D, Plančak M, Alexandrov S, Vilotić D (2012). Influence of friction and number of deformation phases on formability of steel C45E. 1st International Scientific Conference COMETA: 1–8.
- [27] Jenner A, Dodd B (1981). Cold upsetting and free surface ductility. *Journal of Mechanical Working Technology* 5: 31–43.
- [28] Jurković M, Karabegović E, Jurković Z (2006). Formability limit of materials in the hydroforming processes. 10th international research/expert conference “Trends in the development of machinery and associated technology”: 117–120.

-
- [29] Kačmarčik I, Movrin D, Lužanin O, Skakun P, Plančak M, Vilotić D (2011). Determination of friction in bulk metal forming processes. 12th International Conference on Tribology: 111–116.
- [30] Kačmarčik I, Movrin D, Ivanišević A (2011). One contribution to the friction investigation in bulk metal forming. Journal for Technology of Plasticity 36: 35–48.
- [31] Kivivuori S, Juhani O (2010). Simulation of cold formability for cold forming processes. Advanced Knowledge Application in Practice: 85–91.
- [32] Klocke F, Breuer D (2010). Effect of the surface shape on the cold formability of steel workpieces.
- [33] Колмогоров В. Л (1977). Пластичность и разрушение. Металлургия, Москва
- [34] Kolmogorov VL (1995). Model of metal fracture in cold deformation and ductility restoration by annealing, Journal of Materials Processing Defects: 219–233.
- [35] Komjati L (2008). Analiza uticaja kontaktnog trenja i broja ciklusa opterećenja na graničnu deformaciju. Master rad, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad.
- [36] Koçak Ö (2003). Analysis of the formability of metals. Master Thesis.
- [37] Kraišnik M, Vilotić D, Šiđanin L, Petrović Ž (2012). Initial microstructure state impact to steel C45E formability. 11th International scientific conference MMA. Novi Sad.
- [38] Landre J, Pertence A, Cetlin PR, Rodrigues JMC, Martins PAF (2003). On the utilisation of ductile fracture criteria in cold forming. Finite Elements in Analysis and Design 39: 175–186.
- [39] Lin SY (2002). Stress analysis of upsetting with concave curve dies. Journal of Materials Processing Technology 123: 36–41.
- [40] Martins PAF, Bay N, Tekkaya AE, Atkins AG (2014). Characterization of fracture loci in metal forming. International Journal of Mechanical Sciences 83: 112–123.
- [41] Mandić V (2005). Modeliranje i simulacije u obradi deformisanja. WUS Austrija. MF Kragujevac
- [42] Mandić V (2007). Virtualni inženjering. Mašinski fakultet Kragujevac.
- [43] Merklein M, Kuppert A (2009). A method for the layer compression test considering the anisotropic material behavior. Int. J. Mater. Form. 2: 483–486.
- [44] Mirone G (2007). Role of stress triaxiality in elastoplastic characterization and ductile failure prediction. Engineering Fracture Mechanics 74: 1203–1221.
- [45] Movrin D (2013). Eksperimentalna i numerička analiza deformabilnosti materijala u procesima hladnog sabijanja. Magistarski rad. Fakultet tehničkih nauka Novi Sad.
- [46] Murty SVSN, Rao BN, Kashyap BP (2004). Improved ductile fracture criterion for cold forming of spheroidised steel. Journal of Materials Processing Technology 147: 94–101.
- [47] Narayanasamy R, Ramesh T, Pandey KS (2006). Workability studies on cold upsetting of Al-Al₂O₃ composite material. Materials and Design 27: 566–575.

-
- [48] Narayanasamy R, Anandakrishnan V, Pandey KS (2008). Comparison of workability strain and stress parameters of powder metallurgy steels AISI 9840 and AISI 9845 during cold upsetting. *Materials and Design* 29: 1919–1925.
- [49] Petruška J, Janiček L (1998). Computationally-experimental workability determination of compressed cylindrical specimen with surface defect. *Journal of Materials Processing Tehnology* 80–81: 572–578.
- [50] Plančak M, Vilotić D (2012). Tehnologija plastičnog deformisanja. Fakultet tehničkih nauka Novi Sad.
- [51] Ragab AR (2002). Fracture limit curve in upset forging of cylinders. *Materials Science and Engineering A334*: 114–119.
- [52] Saanouni K (2008). On the numerical prediction of the ductile fracture in metal forming. *Engineering Fracture Mechanics* 75: 3545–3559.
- [53] Sebelkin V, Joshi G, Mall S, Porter WJ, John R (2013). Monotonic tension and creep behavior of single crystal CMSX-486 under combustion environment. *Materials Science & Engineering A* 569: 106–116.
- [54] Silva CMA, Alves LM, Nielsen CV, Atkins AG, Martins PAF (2015). Failure by fracture in bulk metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* 215: 287–298.
- [55] Skakun P, Kačmarčik I, Pepelnjak T, Lužanin O, Ivanišević A, Milutinović M (2011). Comparison of conventional and new lubricants for cold forming. 34th International conference in production engineering: 499–502.
- [56] Sljapic V, Hartley P, Pillinger I (2002). Observations on fracture in axi-symmetric and three-dimensional cold upsetting of brass. *Journal of Materials Processing Technology* 125-126: 267–274.
- [57] Tannert M, Brecher C, Bäumlner S, Bakarimow K (2012). Modeling of Machine and Tool Elasticity in Coupled Forging Simulation. Scientific workshop “Simulation in der Umformtechnik”
- [58] Tratting G, Antretter T, Pippan R (2008). Fracture of austenitic steel subject to a wide range of stress triaxiality ratios and crack deformation modes. *Engineering Fracture Mechanics* 75: 223–235.
- [59] Vilotić D, Alexandrov S, Plančak M, Vilotić M, Ivanišević A, Kačmarčik I (2012). Material Formability at Upsetting by Cylindrical and Flat Dies. *Steel Research International*: 258–261.
- [60] Vilotić D (1987). Ponašanje čeličnih materijala u različitim obradnim sistemima hladnog zapreminskog deformisanja, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- [61] Vilotić D, Chikanova N, Alexandrov S (1999). Disc upsetting between spherical dies and its application to the determination of forming limit curves, *Journal of strain analysis* 34: 17–22.

-
- [62] Vilotić D, Plančak M, Grbić S, Alexandrov S, Chikanova N (2003). An approach to determining the workability diagram based on upsetting tests. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 26: 305–310.
- [63] Vilotić D, Plančak M, Čupković Đ, Alexandrov S, Alexandrov N (2006). Free surface fracture in three upsetting tests. *Experimental Mechanics*: 115–120.
- [64] Vilotić D, Alexandrov S, Plančak M, Movrin D, Ivanišević A, Vilotić M (2011). Material formability at upsetting by V-shape dies. *Steel Research International Special Edition*: 923–928.
- [65] Vilotić D, Plančak M, Alexandrov S, Ivanišević A, Movrin D, Milutinović M (2011). Numerical simulation of upsetting of prismatic billets by V-shape dies with experimental verification 34th International conference on production engineering, University of Nis: 782–785.
- [66] Vilotić D, Alexandrov S, Plančak M, Ivanišević A (2012). Use of Non-Axisymmetric Specimens in Upsetting for Determining the Workability Diagram. 19th European Conference on Fracture, Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety, Kazan.
- [67] Vilotić D, Šidanin L, Plančak M, Čupković Đ (2003). Plastična svojstva čelika za kotrljajne ležajeve. VIII Međunarodna konferencija „Fleksibilne tehnologije“ 161–162
- [68] Vilotić D, Alexandrov S, Ivanisevic A, Milutinovic M (2016). Reducibility of stress based workability diagram to strain based workability diagram. *International Journal of Applied Mechanics*.
- [69] Vilotić D, Movrin D, Alexandrov S (2017). A ductile fracture criterion of Ti-6Al-4V at room temperature. *Experimental Mechanics*.
- [70] Vujović V (1984). Određivanje krivih granične deformabilnosti pomoću tri različita naponska stanja. *Jugoslovenski časopis za obradu metala deformisanjem* 9: 61–71.
- [71] Vujović V, Shabaik A (1986). A new workability criteria for ductile fracture. *Journal of Engineering Materials and Technology* 108: 245–249.
- [72] Vujović V, Plančak M, Vilotić D, Shabaik A (1987). The use of cold workability test results to predict FLC as function of stress state, *Proceedings of the 2th International conference on technology of plasticity-ICTP*: 453–459.
- [73] Vujović V (1992). *Deformabilnost. Monografija. Fakultet tehničkih nauka Novi Sad.*
- [74] Ruggles-Wrenn MB, Radzicki AT, Baek SS, Keller KA (2008). Effect of loading rate on the monotonic tensile behavior and tensile strength of an oxide-oxide ceramic composite at 1200°C. *Materials Science and Engineering A* 492: 88–94.
- [75] www.simufact.de
- [76] Yoon SC, Quang P, Hong SI, Kim HS (2007). Die design for homogeneous plastic deformation during equal channel angular pressing. *Journal of Materials Processing Technology* 187–188: 46–50.
- [77] Zienkiewicz OC, Taylor R, Fox D (2014). *The finite element method for solid and Structural Mechanics. Seventh edition, Oxford.*

- [78] Conor M, John M (2001). Failure analysis of cold forging dies using FEA. Journal of Materials Processing Technologies 117: 209-215