

УНИВЕРЗИТЕТ ЦРНЕ ГОРЕ
МЕТАЛУРШКО-ТЕХНОЛОШКИ ФАКУЛТЕТ У ПОДГОРИЦИ

Мр Милош Јелић

Истраживање заосталих напона у поступцима завршне прераде и значај модела њихове дистрибуције за избор особина металних материјала

- докторска дисертација -

Подгорица, септембра 1998. године

10-1294092

539.374: 621.748 (073.3)



MU2IV 559

Encl. op. 12 802

Аутор се посебно захваљује:

- ГОША Холдинг Корпорацији и њеном председнику, инж. Браниславу Милановићу, на разумевању и финансирању овог пројекта,
- проф. др Митру Мишовићу на стручном усмеравању и сугестијама у реализацији научно-истраживачког дела пројекта, а проф. др Драгутину Драшковићу на руковођењу и организацији пројекта у целини,
- Институту ГОША, а нарочито проф. др Драгомиру Цветковићу и инж. Слободану Радосављевићу, на моралној и свакој другој подршци у току реализације пројекта,
- проф. др Милојци Јаћимовићу и инж. Радмили Миловановић на корисним предлозима у циљу побољшања коначне верзије ове дисертације,
- инж. Небојши Тадићу, др Сергеју Бецофену, др Ризаху Бурзићу и инж. Јелисаву Чуровићу на учешћу у спровођењу предвиђеног плана експеримента,
- супрузи Ани, ћерки Ивани и сину Дејану на разумевању и стрпљењу.

САДРЖАЈ

Апстракт.....	1
Abstract.....	2
1. УВОД И ПОСТАВКА ЗАДАТКА.....	3
2. ТЕОРИЈСКИ ДЕО.....	5
2.1 ДЕФИНИЦИЈА ЗАОСТАЛИХ НАПОНА.....	5
2.2 ФОРМИРАЊЕ ЗАОСТАЛИХ НАПОНА.....	6
2.2.1 Избор процеса формирања заосталих напона.....	6
2.3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ МЕТОДЕ МЕРЕЊА ЗАОСТАЛИХ НАПОНА....	8
2.3.1 Напонско и деформационо стање код елемената са заосталим напонима	8
2.3.2 Методе са разарањем	10
2.3.2.1 Метода дифлекције	13
2.3.2.2 Метода скидањем слојева	13
2.3.2.3 Метода бушења	14
2.3.3 Методе без разарања	15
2.3.3.1 Метода рентгенске дифракције	15
2.3.3.2 Метода неутронске дифракције	16
2.3.3.3 Ултразвучна метода	16
2.3.4 Избор метода мерења	17
2.3.4.1 Метода рентгенске дифракције	17
2.3.4.2 Метода дифлекције	26
2.4 ЕФЕКТИ УТИЦАЈА ЗАОСТАЛИХ НАПОНА	26
2.4.1 Модел утицаја заосталих напона	26
2.4.2 Експериментални резултати утицаја заосталих напона	30
2.5 УКЛАЊАЊЕ ЗАОСТАЛИХ НАПОНА	31
2.5.1 Уклањање заосталих напона загревањем (отпуштањем)	32
2.5.1.1 Утицај температуре	32
2.5.1.2 Отпор материјала уклањању заосталих напона	37
2.5.1.3 Утицај величине заосталих напона на њихово уклањање	38
2.5.2 Уклањање заосталих напона пластичном деформацијом	39
2.5.2.1 Једносмерна деформација	39
2.5.2.2 Понашање микронапона	41
2.5.2.3 Циклична деформација	41
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО	44
3.1 МАТЕРИЈАЛ ЗА ИСПИТИВАЊЕ	44
3.2 УЗОРЦИ ЗА ИСПИТИВАЊЕ	45
3.3 ПЛАН ИСПИТИВАЊА	45
3.4 ОПИС МЕТОДА ИСПИТИВАЊА	45
3.4.1 Метода визиопластичности	45
3.4.2 Метода дифлекције	49
3.4.3 Метода рентгенске дифракције	49

3.4.4	Методе испитивања механичких особина	50
3.4.5	Метода истраживања редистрибуције аксијалних заосталих напона	50
3.4.6	Методе истраживања уклањања (релаксације) заосталих напона..	51
3.5	КОРИШЋЕНА ОПРЕМА ЗА ИСПИТИВАЊЕ	51
3.6	РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА	51
3.6.1	Испитивање процеса вучења	52
3.6.1.1	Течење метала и настанак заосталих напона	54
3.6.1.2	Зона деформације и модели течења	55
3.6.1.3	Настанак заосталих напона	56
3.6.2	Испитивање заосталих напона рентгенском дифракцијом	63
3.6.2.1	Избор параметара експеримента	63
3.6.2.2	Резултати мерења и тачност прорачуна	63
3.6.3	Испитивање методом дифлекције	68
3.6.3.1	Резултати мерења и математичка обрада еластичне линије за вучено и жарено стање	68
3.6.3.2	Резултати мерења и математичка обрада еластичне линије за стање после стругања узорка	78
3.6.3.3	Уопштавање модела еластичне линије за стање после редукције пречника стругањем	85
3.6.4	Аксијални заостали напони	91
3.6.4.1	Равнотежно стање настало при дифлекцији и извођење једначина за прорачун напона	91
3.6.4.2	Вредности аксијалних заосталих напона код вучених шипки	94
3.6.4.3	Утицај параметра вучења на вредност аксијалних заосталих напона	99
3.6.4.4	Дистрибуција напона по попречном пресеку	102
3.6.4.5	Редистрибуција заосталих напона	103
3.6.4.6	Извођење једначине за опис редистрибуције напона	106
3.6.5	Испитивање механичких особина	112
3.6.5.1	Деформационо ојачавање челика	118
3.6.5.2	Механичке особине при статичком дејству силе	120
3.6.5.3	Механичке особине при динамичком дејству силе	121
3.6.6	Уклањање заосталих напона	125
3.6.7	Симулација савијања применом методе коначних елемената	127
3.6.8	Упоређење резултата за аксијалне заостале напоне и вучни напон	135
4.	ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА	164
5.	ЛИТЕРАТУРА	167

**ИСТРАЖИВАЊЕ ЗАОСТАЛИХ НАПОНА У ПОСТУПЦИМА ЗАВРШНЕ
ПРЕРАДЕ И ЗНАЧАЈ МОДЕЛА ЊИХОВЕ ДИСТРИБУЦИЈЕ ЗА ИЗБОР
ОСОБИНА МЕТАЛНИХ МАТЕРИЈАЛА**

- докторска дисертација -

ИЗВОД

Кључне речи: заостали напони - компоненте - уклањање - редистрибуција, вучење челичне шипке, рентгенска дифракција, метода дифлекције, механичке особине

У раду су приказани резултати истраживања заосталих напона код вучених шипки конструкционих челика и њиховог утицаја на механичке карактеристике. Проучавани су услови деформације код вучења и повезано нехомогено пластично течење са настанком заосталих напона. Праћено је понашање насталих напона у фазама накнадне дораде вучених шипки и проверен утицај заосталих напона на механичке особине.

Пластично течење код вучења ствара услове за осносиметрично напонско стање заосталих напона. Релативни показатељ нехомогености је линеаран са променљивим знаком код аксијалног, нелинеаран и негативан код радијалног течења и са максимумом на оси у оба случаја.

Измерене вредности на површини методом рентгенске дифракције су у интервалу: од 260 до 640 МПа за аксијалну, од -1030 до 150 МПа за радијалну и од -940 до 300 МПа за обимну компоненту. Аксијални напони одређени методом дифлекције су у интервалу 300 до 670 МПа.

Поступци накнадне обраде знатно мењају заостале напоне изазивајући њихову редистрибуцију и смањење (механичка обрада), односно уклањање (термичка обрада - жарење). Развијени модели еластичне линије и редистрибуција напона код поступака механичке обраде, односно Зенер-Аврамова функција код жарења омогућавају да се прецизно квантификују и контролишу промене заосталих напона код тих поступака. За то су потребне полазне вредности напона, што је такође довољан податак за симулацију ефеката нарушавања равнотеже заосталих напона на основу изведених модела дистрибуције.

Утицај заосталих напона на механичке особине је ограничен и код статичког и код динамичког дејства силе. Модели изворних или редистрибуисаних напона утичу на механичке особине у границама утицаја опорављања.

THE INVESTIGATION OF RESIDUAL STRESSES IN FINAL PRODUCTION PROCESSES AND THE IMPORTANCE OF THEIR DISTRIBUTION MODELS ON METAL PROPERTIES SELECTION

- Ph. D. thesis -

ABSTRACT

KEY WORDS: residual stresses - components - relaxation - redistribution, drawn steel bars, X-Ray diffraction, deflection method, mechanical properties

An investigation on residual stresses in drawn steel bars and their effects on mechanical properties is presented in this issue. Drawing deformation process has been analyzed and non-homogeneous plastic yielding has been correlated with residual stress formation. The behavior of residual stress when drawn bars are submitted to further production processes has been monitored and the effect on mechanical properties is evaluated.

Plastic yielding in drawing process creates conditions for axisymmetrical residual stress field. The indicator of non-homogeneity rate is linear with both signs by axial yielding, non-linear and negative by radial yielding, both attaining the highest values in the axis.

Experimental stress values obtained on bar surface by X-Ray diffraction methods are in following ranges: $260 \div 640$ MPa for axial, $-1030 \div 150$ MPa for radial and $-940 \div 300$ MPa for hoop stresses, while experimental values for axial stresses by deflection method lie between 300 and 670 MPa.

Further production treatment influences residual stresses significantly causing their redistribution and reduction (machining) or their relaxation (heat treatment). Models of bar deflection lines and stress redistribution after machining as well as Zener-Avram function in heat treatment processes make stress evaluation possible and set residual stress change under control. This also enables simulation of the effect of residual stress balance disruption conforming above models.

Static and dynamic tests showed that in both cases the influence of residual stresses on mechanical properties is not significant. Genuine bar specimens and ones with redistributed stresses have confirmed that residual stress effects do not exceed annealing effects.

1. УВОД И ПОСТАВКА ЗАДАТКА

Производи од метала се добијају низом технолошких поступака као што су: обрада деформацијом, ливење, термичка обрада, заваривање, наношење слојева, итд, које дефинитивно одређују механичке особине и њихово понашање у експлоатацији. У свим овим поступцима припреме завршног облика, димензија и особина производа јављају се процесне нехомогености које се трајно акумулирају у металу стварајући тако макро и микро-заостале напоне. Макрозаостали напони су запремински уравнотежени, али и латентно са високом нестабилношћу, пошто се промене врло интензивно манифестују при било каквом нарушавању равнотеже.

Висока нестабилност због присуства заосталих напона изазива нестабилност самог елемента, односно конструкције, па уколико постоји опасност да дође до нарушавања равнотеже, морају се предузети адекватне мере за њихово уклањање, смањење или редистрибуцију. Најчешће последице при нарушавању равнотеже су трајне димензионе промене што захтева посебне поступке помоћу којих се поуздано може контролисати уклањање заосталих напона. Ако до нарушавања равнотеже долази неконтролисано, ефекти релаксације напона могу изазвати трајна оштећења, и тиме смањити поузданост конструкционог елемента. Али, ако у фази експлоатације не постоји могућност неконтролисане релаксације, напони могу бити остављени или вештачки изазвани неким од поступака који, са своје стране, омогућавају контролу њихових карактеристика (знака, интензитета, дистрибуције,...). Присуство заосталих напона изазива значајну промену физичко-хемијских особина од којих је за конструкцију веома важна корозиона постојаност, а код материјала за посебне намене и остале особине (електричне, магнетне и тсл).

Макро-заостали напони морају се посматрати као тензор најчешће са просторним и раванским напонским стањем. Због тога се њихово истраживање мора започети са идентификацијом самог напонског стања. Све компоненте таквог тензора су уравнотежене. Уравнотеженост настаје као последица нехомогености процеса, карактеристика материјала и физичких предуслова на спољашњим (граничним) површинама. За сваку компоненту је неопходно прецизирати такве предуслове јер се тако одређују и могућности њихове анализе и мерења. Тако је у овом раду истраживање започето дефинисањем компоненти тензора заосталих напона код челичних шипки које се припремају процесом хладног вучења. Деформација у процесу је осносиметрична, па су и предуслови нехомогености такви да се формира осносиметрично стање заосталих напона. За потпуно прецизирање компоненти тензора неопходно је детаљно истраживања течења материјала у процесу деформације чиме се истраживање наставља на задатак деформационо-напонске анализе самог процеса. Еластично-пластично стање се у таквој анализи може успешно приказати методом симулације, док се анализа пластичног течења завршава квантификацијом нехомогености која остаје у простору обухваћеном течењем.

Ограничена тачност симулације и непотпуност код примене пластичног течења захтевају експериментално мерење самих напона. Експерименталне технике се морају прилагодити предусловима код појединих компоненти напона. Допунска специфичност за мерење заосталих напона је одсуство спољашње силе чије је мерење у основи свих напонско деформационих анализа. Због тога су код заосталих напона развијена мерења заснована на ефектима њиховог дејства у материјалу (поступци без разарања) или мерења ефекта контролисаног нарушавања равнотеже (механички поступци). Мерења су код обе групе усавершена применом савремене опреме, тако да се данас добијају вредности макронапона са

тачношћу до 20 МПа . Физичке карактеристике код прве групе омогућавају мерење и микронапона, али се у том делу још раде опсежна истраживања у циљу повећавања тачности мерења. Избор технике мерења је појединачни задатак за сваки конкретан случај. Код вучених шипки са оносиметричним напонским стањем издвојена су два сегмента, и то: мерење све три компоненте напона због значаја познавања њихових вредности за опис напонског стања, и мерења са детаљним истраживањем аксијалних заосталих напона због посебног значаја ових напона за димензиону стабилност комада велике дужине. У првом сегменту је прихватљива метода дифракције, па је изабрана рентгенска дифракција, а у другом је развијена и примењена метода дифлекције као поуздан механички поступак за одређивање аксијалних заосталих напона. У оба случаја се могу одредити напони на површини елемента. Како је појединачна вредност често недовољна, то је у раду посебно истраживана дистрибуција аксијалних напона у простору њиховог уравнотежења. Неопходни ниво анализе за овај део задатка захтева комплексно моделирање са извођењем експериментално-теоријских једначина из података добијених методом дифлекције како би се корелисале вредности напона и променљиви услови у процесу настанка или накнадне дораде елемента са заосталим напонима. У том смислу су и извршена истраживања редистрибуције напона (када долази до промене димензија елемента) и релаксације напона (када се елементи третирају термички или механички).

Појединачне експерименталне вредности напона омогућавају примену симулационих анализа од којих је одабрана метода коначних елемената за комплексну проверу (предвиђање) ефеката дејства заосталих напона па тиме и оцену сигурности елемента.

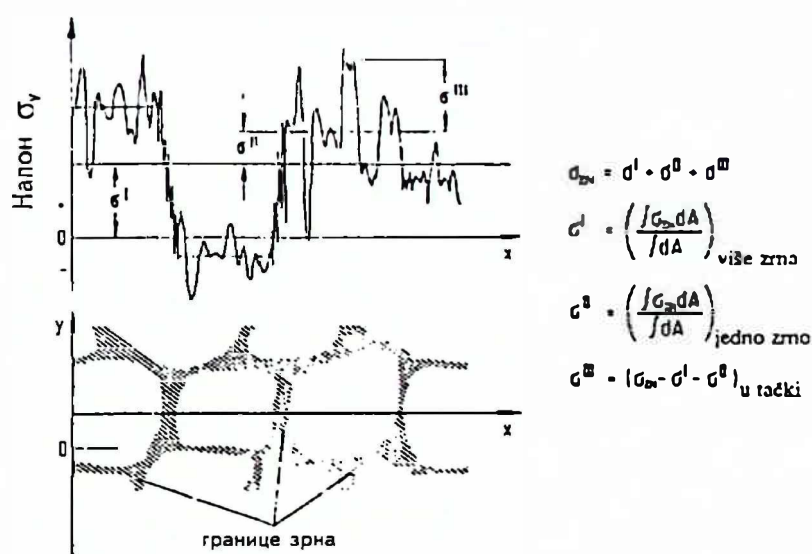
Значај истраживања није ограничен само на могуће ефекте када долази до нарушавања равнотеже већ и на њихов утицај на механичке особине. Због тога је овој корелацији у раду посвећено комплексно истраживање утицаја модела заосталих напона на механичке особине при статичком и динамичком дејству силе. Избором пречника вучених шипки је омогућено да се значајан део испитивања обави на оригиналним узорцима. За квантитативну оцену максималних ефеката су изабрани поступци са суперпозицијом спољашњих и заосталих напона.

Карактеристични сегменти у образложењу процеса вучења су већ потенцирани у делу тензора напона и знака аксијалних напона. Како се овај процес примењује код практично свих метала и легура намењених за добијање жице, шипки, цеви и профила у широком интервалу димензија, то изучавање заосталих напона постаје веома значајно за сам процес, као и за његове производе.

2. ТЕОРИЈСКИ ДЕО

2.1 ДЕФИНИЦИЈА ЗАОСТАЛИХ НАПОНА

Полазећи од мерно-техничких претпоставки, пре десетак година је утврђена дефиниција заосталих напона. Заостали напон у једној тачки је одређен као збир напона прве, друге и треће врсте (слика 2.1). Напон прве врсте је одређен средњом вредношћу у једној макроскопској (реалној) димензији која садржи више металних зрна; напон друге врсте је одређен разликом средње вредности напона у једном зрну и напона прве врсте, док је напон треће врсте одређен разликом напона у тачки у односу на средњу вредност напона у зрну у коме се налази посматрана тачка. Уобичајено се да се напони прве врсте називају макронапонима, док су напони друге и треће врсте познати као микронапони [1].



Слика 2.1 - Класификација заосталих напона у односу на микроструктуру

Ниво макроскопских напона одговара разматрању и опису који полазе од једначина механике континуума. Напони друге врсте се стварају на нивоу металног зрна код хомогених материјала, односно на нивоу међупростора код композитних материјала услед њихове анизотопије или нехомогености (неслагања коефицијената термичког ширења, неслагања еластичних константи, неслагања пластичног течења различитих фаза или, чак, појединих зрна). Напони треће врсте се јављају на нивоу атомских димензија (унутар зрна), а потичу од локалних напонских поља у околини дислокација [2].

Одређивање свих компоненти напона само на основу поступка мерења није увек могуће. Само присуство све три врсте напона је зависно од материјала, али и од претходног оптерећења. Тако се према [3], код затезног напона малог интензитета и ситнозрнасте структуре материјала формирају заостали напони прве врсте, док се код савијања јављају напони и прве и друге врсте. Међутим, непознавање тачних удела напона прве, друге и треће врсте није од значаја све док се резултати у поновљеним експериментима незнатно разликују и док су они у јасном односу према одређеним особинама материјала, односно конструкционог елемента.

2.2 ФОРМИРАЊЕ ЗАОСТАЛИХ НАПОНА

Заостали напони се класификују најчешће према технолошком поступку при коме су настали, па се тада говори о:

- заосталим напонима при ливењу,
- заосталим напонима при обради деформацијом,
- заосталим напонима при површинској обради,
- заосталим напонима при термичкој обради,
- заосталим напонима при спајању,
- заосталим напонима при наношењу слојева и
- заосталим напонима при процесу дифузије.

Сваки од ових поступака носи у себи одређене специфичности које генеришу карактеристичне заостале напоне. У поступку обраде резањем на стругу, на пример, на површини се стварају затезни напони у аксијалном правцу, али они у релативном танком подслоју ($\approx 20\mu\text{m}$) прелазе у притисне. Код овог поступка, по правилу, највећи су обимни напони (у обимном правцу) који су по карактеру затезни, а на површини достижу вредност од 700 МПа. Са повећањем брзине ротације узорка смањује се дебљина еластично деформисаног подслоја, док повећање радијалне брзине резања изазива супротан ефекат [4]. Код површинске обраде сачмарењем притисни заостали напони достижу своју максималну вредност на дубини од $50 \div 100\mu\text{m}$ од површине. Повећањем притиска ваздуха повећава се интензитет заосталих напона, уз задржавање положаја екстремне вредности напона. Величина куглица, пак, не утиче на интензитет максималне вредности напона, али повећање пречника помера положај максимума у дубље слојеве. Претходно глодање и хоновање не утичу на вредност и положај максимума напона, али се задржавају велики притисни напони на површини који остају после претходне обраде [5].

Разлози за настајање заосталих напона су условљени не само технолошким процесом (хемијским, механичким или термичким), већ и начином (условима) спровођења поступка, као и материјалом од ког је израђен конструкциони елемент. Појединачни разлози за настанак заосталих напона могу бити: фазне трансформације (изазване променом температуре или дејством напона) и на тај начин промењена дужина, дилатација изавана променом температуре и промене изазване деформацијом, али се у већини стварних технолошких поступака ради о резултујућем ефекту више појединачних узрока, што отежава њихово изучавање.

2.2.1 Избор процеса за формирање заосталих напона

Код класичних метала и легура намењених за коришћење у машинској индустрији хладно вучење и хладно ваљање као поступци припреме заузимају значајно место.

Процес хладног ваљања се првенствено користи код лимова. Деформације које доводе до појаве заосталих напона везане су за неправилан облик траке или ваљака [6 - 9]. Изучавање напона тада добија на значају ако се жели спречити појава таласавости или добијање неправилног профила траке [6]. Овим проблемима је и досада посвећивано доста пажње, тако да контролисани услови у савременој пракси, по правилу, ове појаве елиминишу. Данас се овај проблем

поново актуелизује код ваљања савремених материјала (типа двослојних или "сендвич"-лимова, односно лимова од других композитних материјала) [10-14].

Процес хладног вучења се разликује од хладног ваљања. Он се, са аспекта циља, може груписати у:

- вучење ради редукције попречног пресека и
- калибрационо вучење.

У првом случају се примењују високи степени редукције да би се број операција свео на минимум и он се користи за припрему жица и (делимично) цеви. Код калибрационог вучења, пак, захтева се добијање тачних димензија (толеранција) и квалитета површине, па се користи за производњу шипки, а у знатној мери и цеви.

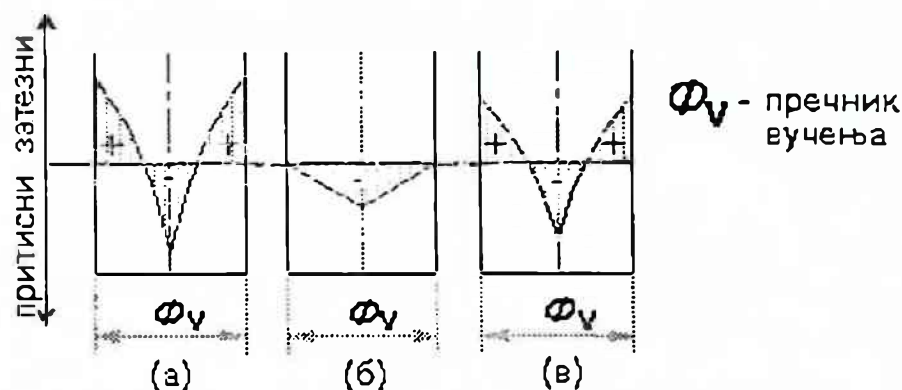
Заостали напони су детаљније испитивани код жице и цеви. Развијени поступци и добијена решења су дати у радовима [15-18].

Испитивање напона код шипки је још увек недовољно истражено што може бити последица експерименталних тешкоћа и низа специфичности које се директно одражавају на тачност добијених резултата [17,19]. Наиме, код ових масивнијих комада у фазама припреме (топлог ваљања) и накнадне деформације са просторним асиметричним течењем, појава напона је условљена нехомогеним хлађењем и течењем [20,21,22]. У потоњем случају, течење на попречном пресеку је нехомогено услед геометрије зоне деформације и контактних појава на површини додира метала и алата, што неизбежно доводи до појаве заосталих напона. Такав утицај се манифестује и у области малих пречника вучених производа. Тако је, рецимо, у раду [17] вршено истраживање до 0,8 mm пречника и евидентирани су мерљиве вредности заосталих напона, што недвосмислено потврђује да су настали заостали напони специфичност процеса, те да су присутни у материјалу увек после обраде вучењем. То је и био разлог да се овај процес одабере за експериментално формирање заосталих напона у челичним шипкама, односно њихов даљи третман за реализацију циљева овог рада.

Повезаност појаве заосталих напона са течењем захтева његово детаљно изучавање у зони обухваћеној деформацијом. Његова нехомогеност је била евидентирана у радовима Бекофена и Перлина [20,21], а квантитативно је описана математичким једначинама у раду Копа и Павлевског [22]. Касније је усавршен експериментални поступак - познат као визиопластичност, који је уведен у радовима Томсена [23], а затим прихваћен и доказан као прихватљива експериментално-теоријска процедура за опис, не само течења већ и компоненти напона. Сходно томе, овде ће бити прихваћена метода визиопластичности имајући у виду њену афирмисаност у изучавању проблематике вучења шипки [24,25,26], као и у дефинисању услова настанка заосталих напона [27,28].

У односу на веома мало изучени настанак заосталих напона код шипки, поједностављени модели дистрибуције су дати у појединим радовима. Тако су веома често коришћене шеме приказане на слици 2.2 [20]. Препознатљива је блискост промене аксијалних и обимних напона - од затезних на површини до притисних на оси. Радијални напони се уравнотежују у негативној области и једнаки су нули на површини што је у складу са физичким стањем на слободној површини. Облици промене су, међутим, у раду поједностављени пошто су објашњења заснована на споља видљивим ефектима. Овакве шеме су прихваћене и пренешене у великом броју накнадних радова, па се и данас издвајају као једна од карактеристика процеса.

Заостали напони могу бити извор латентне опасности за тачност димензија и подужну поравнатост вучених шипки што ствара потребу да се они релаксацијом или редистрибуцијом преведу на безопасан облик и вредности. Овакав захтев је морао бити решен кроз одговарајућу технолошку операцију што је урађено кроз поступак равнања на машини са хиперболичним ваљцима. Као ефекат ове операције јавља се релаксација аксијалних заосталих напона на површини или



Слика 2.2 - Шеме дистрибуције аксијалних (а), радијалних (б), и обимних (в) заосталих напона у вученој шипци без накнадне обраде

операције јавља се релаксација аксијалних заосталих напона на површини или њихова редистрибуција превођењем у притисне, што ће бити детаљно елаборирано у поглављу 3.4.6.

2.3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ МЕТОДЕ МЕРЕЊА ЗАОСТАЛИХ НАПОНА

Данас се примењује већи број експерименталних метода којима се мере заостали напони, како на експерименталним узорцима, тако и на конструкционим елементима. Без обзира на њихов велики број, свака од метода има своја ограничења у примени, па је за сваки конкретан случај, пре избора одговарајуће методе, потребно извршити анализу са следећих аспеката:

- модела дејства напона;
- компоненти које се могу одредити;
- примењених техничких решења при мерењу;
- регистрације сигнала и одређивања вредности жељених величина.

Механички и електрични поступци са мерним тракама (МТ) омогућују мерење деформације (издужење/скраћење: $\pm \epsilon$, промену угла: $\pm \gamma$) и на основу тога се прорачунавају заостали напони користећи Хуков закон. Да би се извршило комплетно мерење, морају се траке поставити на различитим местима. Уз то, потребно је додатно вршити стругање, бушење или резање да би се растерећењем могле снимити промене, што омогућује утврђивање локалних напона на површини. На основу истог принципа могу се оценити заостали напони унутар материјала, ако се примени претпостављени модел расподеле напона. Једно мерење показује само средњу вредност напона и она покрива област од само неколико милиметара, па је његово уопштавање апроксимативно.

2.3.1. Напонско и деформационо стање код елемената са заосталим напонима

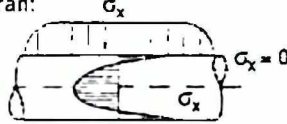
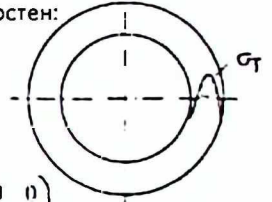
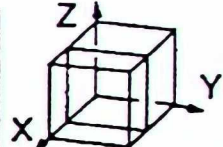
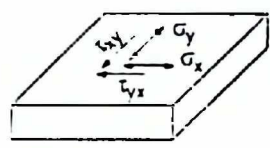
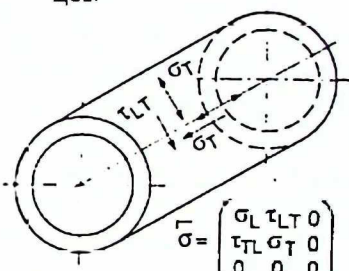
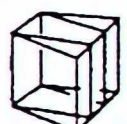
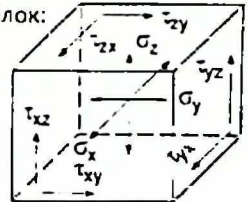

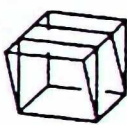
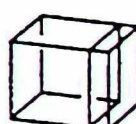
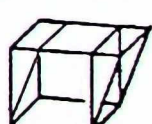
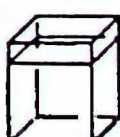
Уопштено стање напона је троосно са три нормална и три тангенцијална напона. У табели 2.1 приказано је троосно, двоосно и једноосно напонско стање. Деформационо стање је најчешће троосно, будући да су дво- и једноосне деформације присутне само у специјалним случајевима. За потпуну анализу напона

мора се на сваком месту у материјалу одредити матрица напона са њених шест компоненти.

Табела 2.2 показује појединачно свих шест компоненти деформација на елементарном кубу. Све ове деформације се не могу измерити применом механичких поступака већ се данас у случају потребе за таквим мерењем користи рентгенска интегрална метода која омогућава приближан опис стања заосталих напона.

Табела 2.1 - Једноосно, двоосно и троосно напонско стање на елементарним узорцима

Табела 2.2 - Шематски приказ елементарних деформација

<p>Штан:</p>  $\underline{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	<p>Прстен:</p>  $\underline{\sigma} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_T & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ 
<p>Лим:</p>  $\underline{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	<p>Цев:</p>  $\underline{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_r & \tau_{rt} & 0 \\ \tau_{tr} & \sigma_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & \epsilon_{12} & 0 \\ \epsilon_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ 
<p>Блок:</p>  <p>На површини су нормални напони једнаки нули.</p> $\underline{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \sigma_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}$	<p>Пуни цилиндар:</p>  $\underline{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_r & \tau_{rt} & \sigma_{\theta\theta} \\ \tau_{tr} & \sigma_t & \tau_{t\theta} \\ \tau_{\theta r} & \tau_{\theta t} & \sigma_{\theta\theta} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & \epsilon_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ \epsilon_{13} & 0 & 0 \end{pmatrix}$ 
		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ 
		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{23} \\ 0 & \epsilon_{23} & 0 \end{pmatrix}$ 
		$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix}$ 

Приказ поступака са уведеним претпоставкама је дат у табели 2.3, а једначине за једно-, дво- и троосно стање напона и деформација према Хуковом закону су дате у табели 2.4. При томе, треба уочити да је свака измерена вредност везана за специфично напонско стање. Такође се мора имати у виду да за везу напона и деформације овде важи Хуков закон, те да се у случају пластичне деформације напони морају израчунати по другим релацијама. Поред наведеног, морају бити испуњени и одговарајући физички и механички услови који могу бити од утицаја на измерену вредност напона на површини комада. То укључује и услов да компонента нормалног напона на слободној површини и компоненте тангенцијалних напона које садрже индекс овог нормалног напона морају бити једнаки нули. То значи да у случају када је Z - оса усмерена у правцу нормалног напона важи:

$$\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad \text{и} \quad \sigma_R = \tau_{TR} = \tau_{LR} = 0 \quad (2.1)$$

Поред тога, компоненте напона и одговарајући моменти у три произвољна правца морају бити уравнотежени:

$$\int dF = 0, \\ \int \sigma_x df_x = 0, \quad \int \sigma_y df_y = 0, \quad \int \sigma_z df_z = 0, \quad (2.2)$$

односно:

$$\int dM = 0, \\ \int \tau_{xy} z df_x = 0, \quad \int \tau_{yz} x df_y = 0, \quad \int \tau_{zx} y df_z = 0, \quad (2.3)$$

Ако ове услове није могуће проверити (као код неких метода са разарањем), то се расподела мерних вредности мора рачунски или графички одредити тако да се евентуално расипање сведе на малу меру.

За прорачун напона помоћу диференцијалних једначина код метода бушења рупе, испуњени су услови равнотеже сила при сваком мерењу. Тада ће, чак и погрешне мерне вредности пружити правилну слику о расподели. Измерене вредности морају бити испод границе почетка пластичног течења, што значи да се ова граница може користити за контролу пластичног течења. Услови пластичног течења су:

$$\sigma_1 = R_{p0.2} \quad \text{за једноосно напонско стање}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = R_{p0.2} \quad \text{за двоосно напонско стање}$$

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = R_{p0.2} \quad \text{за троосно стање (по Трески)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = R_{p0.2} \quad (\text{по Мизесу})$$

Из претходног произлази да код раванског и просторног напонског стања компоненте напона појединачно могу бити веће од $R_{p0.2}$, али леве стране горњих једначина морају бити мање од границе течења.

У сваком случају мерне вредности, и на основу њих прорачуната расподела напона, морају бити дефинисане по правцу да би одговарајући закључци били поуздани. Без обзира да ли се примењује рачунски или експериментални поступак, морају се имати подаци о тачности резултата. Пошто су и измерени и прорачунати резултати приближни, онда се и вредност грешке јавља као приближан резултат.

2.3.2 Методе са разарањем

Суштина метода са разарањем је у томе да се резањем, глодањем или бушењем врши делимично или потпуно растеређење мерног места, па се на основу еластичног враћања израчунавају заостали напони.

Табела 2.3 Поступци мерења заосталих напона и њихове претпоставке

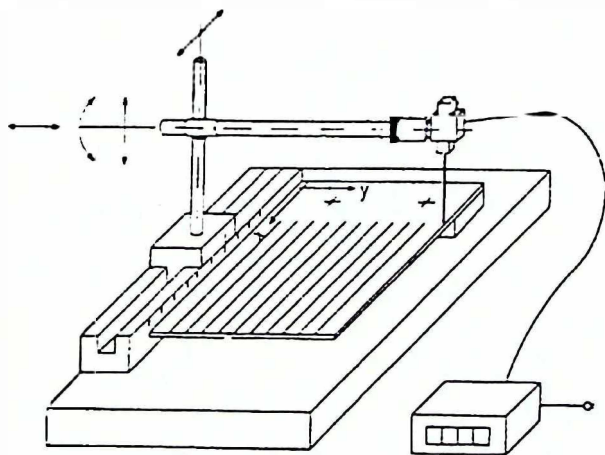
Метода / поступак	Тензор напона	Облик узорка и расподела напона
Дифлекција	$\sigma' = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ & 0 & 0 \\ & & 0 \end{bmatrix}$	Раван узорак и танкозида цев; σ' је функција дужине
Ослобађање слојева	$\sigma' = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ & \sigma_y & 0 \\ & & 0 \end{bmatrix}$	Раван узорак; σ' је константан по дебљини пробе и на мерном месту
Скидање слојева	$\sigma'(x,y) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ & \sigma_y & 0 \\ & & 0 \end{bmatrix}$	Раван узорак; σ' је функција x и y , константно по дебљини;
Бушење отвора	$\sigma(r) = \begin{bmatrix} \sigma_L & \tau_{LT} & 0 \\ & \sigma_T & 0 \\ & & \sigma_R \end{bmatrix}$	Цилиндрични узорак; σ' је функција радијуса r и константна по дужини узорка.
Бушење рупе	$\sigma' = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ & \sigma_y & 0 \\ & & 0 \end{bmatrix}$	Мерно место $3 \times 3 \text{ cm}^2$ - равно; σ' - нема промене по дубини бушења.
Прстен - језгро	$\sigma(z) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ & \sigma_y & 0 \\ & & 0 \end{bmatrix}$	Мерно место $3 \times 3 \text{ cm}^2$ - равно; σ' је функција дубине бушења за $z \leq 5 \text{ mm}$.
ϵ - анализа у равни	$\sigma(z) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ & \sigma_y & 0 \\ & & 0 \end{bmatrix}$	Мерно место $3 \times 3 \text{ cm}^2$ - равно; σ' је функција дубине бушења за $z \leq 15 \text{ mm}$.
Дифракција $\sin^2 \psi$ поступак	$\sigma' = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ & \sigma_y & 0 \\ & & 0 \end{bmatrix}$	Мерно место: неколико cm^2 - равно σ' је константно у области продирања зрака
Рентгенска интегрална метода (поступак)	$\sigma(z) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ & \sigma_y & \tau_{yz} \\ & & \sigma_z \end{bmatrix}$	Мерно место: неколико cm^2 - равно или закривљено; σ : двоосно у области продирања R_0 - зрака.

Троос		$\sigma_z = \frac{E}{1+\mu} \left[\epsilon_z + \frac{\mu}{1-2\mu} (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) \right]$	
Двоосно напонско стање	Деформација у z-правцу нула. $\frac{E}{1+\mu} \cdot \epsilon_x = \sigma_x (1-\mu) - \sigma_y \mu$ $\frac{E}{1+\mu} \cdot \epsilon_y = \sigma_y (1-\mu) - \sigma_x \mu$ $\epsilon_z = 0$	$\sigma_x = \frac{E}{1+\mu} \left[\epsilon_x + \frac{\mu}{1-2\mu} (\epsilon_x + \epsilon_y) \right]$ $\sigma_y = \frac{E}{1+\mu} \left[\epsilon_y + \frac{\mu}{1-2\mu} (\epsilon_x + \epsilon_y) \right]$ $\sigma_z = \frac{E}{1+\mu} \left[\frac{\mu}{1-2\mu} (\epsilon_x + \epsilon_y) \right]$ Из $\epsilon_z = 0 \Rightarrow \sigma_z = \mu \cdot (\sigma_x + \sigma_y)$	$\epsilon_z = 0$ Уопштено деформационо стање призматичног тела под дејством попречних сила или код спречавања промене дужине.
	$E \cdot \epsilon_x = \sigma_x - \mu \cdot \sigma_y$ $E \cdot \epsilon_y = \sigma_y - \mu \cdot \sigma_x$ $\epsilon_z = -\frac{\mu}{1-\mu} \cdot (\epsilon_x + \epsilon_y)$	Напон у z-правцу једнаки нули. $\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\epsilon_x + \mu \epsilon_y)$ $\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\epsilon_y + \mu \epsilon_x)$ $\sigma_z = 0$	$\sigma_z = 0$ Уопштено макроскопско напонско стање са неоптерећеном површином.
Једноосно напонско стање	Само деформација у x-правцу $\frac{E}{1+\mu} \cdot \epsilon_x = \frac{1-2\mu}{1-\mu} \sigma_x$ $\epsilon_y = 0$ $\epsilon_z = 0$	$\sigma_x = \frac{E}{1+\mu} \cdot \frac{1-\mu}{1-2\mu} \cdot \epsilon_x$ $\sigma_y = \frac{E}{1+\mu} \cdot \frac{\mu}{1-2\mu} \cdot \epsilon_x$ $\sigma_z = \frac{E}{1+\mu} \cdot \frac{\mu}{1-2\mu} \cdot \epsilon_x$	$\epsilon_y = \epsilon_z = 0$ Затегнуто или притиснуто тело са спреченом попречном деформацијом
	$E \cdot \epsilon_x = \sigma_x$ $E \cdot \epsilon_y = -\mu \cdot \sigma_x$ $E \cdot \epsilon_z = -\mu \cdot \sigma_x$	Само напон у x-правцу $\sigma_x = E \cdot \epsilon_x$ $\sigma_y = 0$ $\sigma_z = 0$	$\sigma_y = \sigma_z = 0$ Затегнуто или притиснуто тело са слободном деформацијом у попречном правцу.

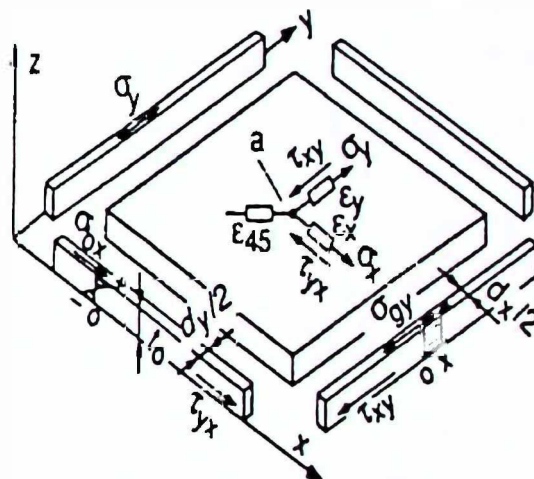
2.3.2.1 Метода дифлекције

Метода се базира на оцени заосталих напона у елементима на основу резултата дифлекције (угиба). Ако се као напонски модели узму једноосно затезање или савијање, штап се у поступку мерења подужно разрезаује. Код танких танки прстенова, пак, резање се врши у радијалном правцу. Када је реч о лимовима, они се режу у паралелне траке (слика 2.3). Еластично враћање се изводи на основу савијања или линијских деформација ($\varepsilon_s, \varepsilon_l$). Ако се мери механичко савијање на крајевима траке, тада се може израчунати само средња вредност ε_s , а ε_l занемарити. При мерењу на слободним крајевима нема бочних сила, па је еластична деформација савијања последица момента савијања. У случају кад су постављене мерне траке између крајева комада, онда се мери резултујуће дејство момента савијања и дејство бочних сила. Мерењем савијања у три тачке могу се добити једноосни подужни заостали напони. Једначина угиба садржи три непозната коефицијента што значи да су за мерење подужних напона потребна три мерна места.

Применом мерне розете у средини лима, а затим одвајањем малих трака, може се добити расподела напона у три равни (слика 2.4).



Слика 2.3 - Уређај за мерење по поступку ослобађања слојева код лимова



Слика 2.4 - Коришћење мерних трака повезаних у розету код поступка ослобађања слојева

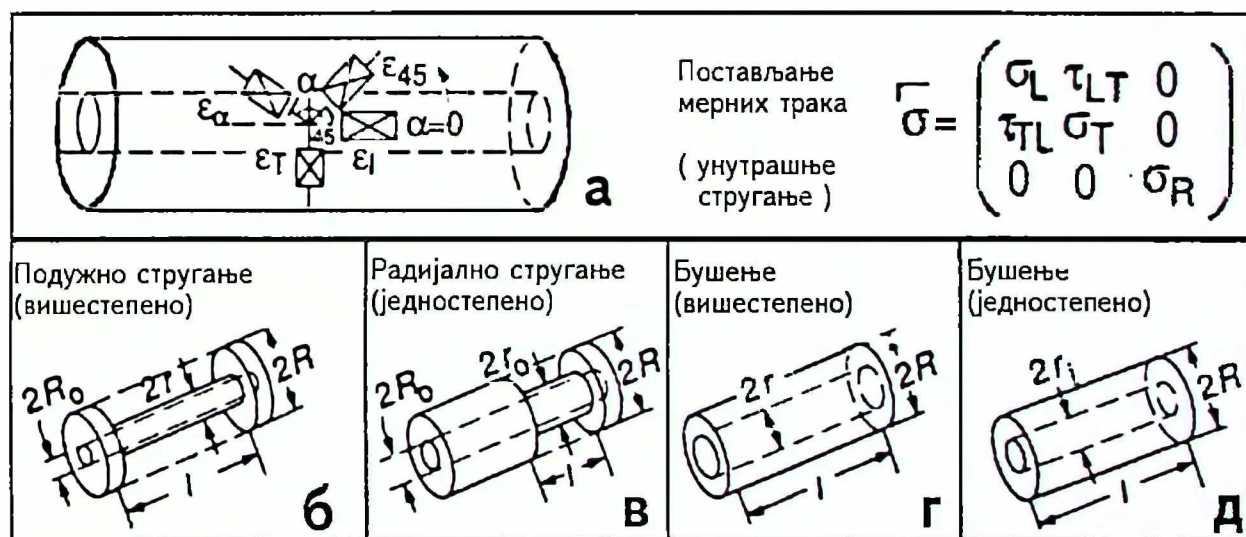
2.3.2.2 Метода скидањем слојева

Ако је потребно одредити расподелу заосталих напона по дебљини узорка, то се изводи постепеним скидањем материјала и решавањем одговарајуће диференцијалне једначине. Као модел напона користи се ваљак (са спољашњим или унутрашњим оптерећењем) или правоугаони штап оптерећен на савијање.

Примена методе за кружни штап предвиђа стругање и мерење промене дужине услед стругања. Таква промена одређује средњи напон у слоју скинутог материјала. Значи да се наизменичним скидањем материјала и мерењем промена

напона (у изворној једначини су промене дате у диференцијалном облику). Да би се то превело на тачну расподелу, онда се мора одредити промена при диференцијалном скидању, што се може радити или математички - апроксимацијом измерених средњих вредности, или локално рачунати на основу диференцијалних услова равнотеже. Пошто се мери деформација само по једној димензији (повећање/смањење дужине), то се измерена деформација повезује само са дејством силе (напона) у правцу мерења деформације. (Стварни ефекат деформације је резултат дејства интензитета напона, што значи да би се морало узети у обзир и дејство осталих напона, у конкретном случају - попречни напон.) Пошто су слободне попречне површине, онда су подужни напони једнаки нули. Како је ефективна деформација као резултат дејства сва три напона већа од сваке појединачне деформације, то ће и измерена деформација у једном правцу представљати једну од те три деформације.

Ако се мора бушити или стругати шупљи цилиндар који има мерне траке на површини која се не обрађује, то претходна ограничења нису од значаја, слика 2.5. Овим поступком могу се одредити три нормална и један тангенцијални напон, као и њихова расподела. Непосредно на мерном месту не може се вршити мерење већ се мора вршити екстраполација. То увек доводи до извесне нетачности, па се зато примењује скидање у више пролаза и прорачунавање. Поступак је прво примењен на правоугаоном штапу, а касније је проширен и на лимове. Прорачун напона у случају штапова се може вршити са једначинама који не садрже тоталне диференцијале (за промену димензије која се скида), већ је довољно користити коначну вредност корака. Као штап може се користити и оригинални комад тако што се прво измере напони, а онда се изврши одговарајући прорачун.



Слика 2.5 - Метода скидања слојева код шупљег цилиндра (а, б, в) и метода бушења (г, д)

2.3.2.3 Метода бушења

Овом методом се мере заостали напони и њихова расподела по пресеку конструкционог елемента. Код извођења експеримента долазе до пуног изражаја релације између мерних и ефективних величина што значи да се на одговарајући начин морају вредновати и добијени резултати. Поступак се састоји у мерењу еластичне деформације (еластичног враћања) које може бити: подужно, попречно и под углом од 45°. На основу таквог еластичног враћања се прорачунавају

величине деформација и величине уклоњене запремине. Напони се даље прорачунавају а основу формула које садрже све прорачунате вредности деформације и запремине.

KWU је 1970. развио и патентирао поступак "прстен - језгро" [29]. При томе се на комаду цилиндрично језгро постепено буши и мери еластично враћање помоћу мерних розета постављених на његовој чеоној површини. На основу калибрационе криве из поступка затезања могу се оценити заостали напони на дубини 2–4 mm. Овај поступак захтева посебан прибор за бушење. Мерни проводници код трака морају кроз шупљу осовину бити напоље изведени. До дубине од 10 mm прорачун се може вршити без додатне калибрације за промену напона по дубини рупе.

Једно од решења (додуше, непатентирано) представља "ε- просторна анализа". Суштина је да се у два степена буши рупа дефинисане дужине и користи ослобођена еластична енергија за прорачун градијента по дубини. Вишеосна напонска анализа је могућа на више начина:

- помоћу мерних розета где је мерно место у облику троугласте или квадратне призме (примењује се глодање и мери еластично враћање као функција дубине бушења),
- постепеним оптерећењем појединих трака ширењем или дубљењем рупе,
- помоћу мерних трака у троугластом поретку које детектују ефекте бушења кружних рупа.

У свим овим поступцима битно је одредити место за постављање мерних трака као и димензије језгра. Досадашње искуство показује да се ефекат растеређења може регистровати на растојању до 50 mm од места на коме се врши бушење [29].

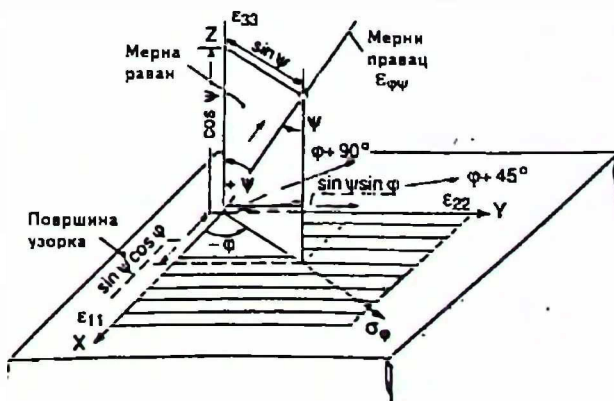
2.3.3 Методе без разарања

2.3.3.1 Метода рентгенске дифракције

Код поступака заснованих на дифракцији зрака прате се промене на зрацима који долазе у контакт са оптерећеним елементом. На основу њихове рефлексије на атомским равнина испитује се промена интензитета и угла рефлектованих зрака и са тим повезана деформација. Помоћу Хуковог закона одређују се заостали напони.

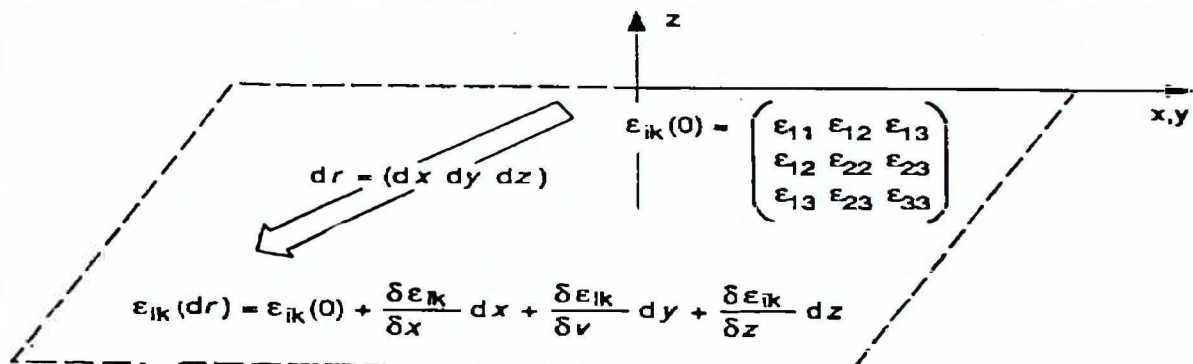
Поступак $\sin^2 \psi$, који су 1961. године предложили Махенраух и Милер, је заснован на постулату да монохроматски R \ddot{o} -зрак садржи податак о површинској деформацији. Пошто се овим поступком мери међуатомско растојање, то се за различите углове ψ (приказане у координатама $\sin^2 \psi$) добија елипсоид деформације као линеарна функција угла ψ . Пошто се на основу елипсоида деформације (ϵ_ϕ) може прорачунати елипсоид напона, то се и компоненте елипсоида напона могу прорачунати, ако се мерење дифракције врши у ϕ - равни, у складу са сликом 2.6.

$$\epsilon_{\psi\phi} = \epsilon_{11} \cdot \sin^2 \psi \cos^2 \phi - \epsilon_{22} \cdot \sin^2 \psi \sin^2 \phi - \epsilon_{33} \cdot \cos^2 \psi + \epsilon_{12} \cdot 2 \sin \phi \cos \phi \sin^2 \psi + \epsilon_{13} \cdot 2 \cos \phi \sin \psi \cos \psi + \epsilon_{23} \cdot 2 \sin \phi \sin \psi \cos \psi$$



Слика 2.6 - Принцип методе рентгенске дифракције по $\sin^2 \psi$ техници

Рентгенска интегрална метода се заснива на анализи промене интензитета дифрактаног зрака као допуне стандардне методе која се заснива на мерењу положаја Брагвог угла. Праћењем промене интензитета рефлектованог зрака могуће је одредити промене по дубини продирања R \ddot{o} -зрака. Обзиром да се ради о поступку интеграције за одређивање интензитета, односно елипсоида деформација, то се и поступак назива интегрална метода. Ово је значајно код површинске обраде због модела дистрибуције напона који може показати максималне вредности на површини, испод површине, односно у случају нанетих слојева, чак и у основном металу. На слици 2.7 је наведено како се шест компоненти деформација ϵ_{ij} у једној тачки изводи на основу измерених ϵ_{ij} компоненти [29]. R \ddot{o} -зрак сусреће на свом путу кроз материјал различите тачке са компонентама деформације. Код мале дубине продирања матрица се може развити по Тејлору (слика 2.7), што после израчунавања линеарних чланова захтева опис преко $4 \times 6 = 24$ елемената матрице површинског оптерећења и њихових градијената. Као контрола за правилно мерење и прорачун се користе гранични услови, по којима на слободној површини нормални напони морају бити једнаки нули. Треба скренути пажњу да у Рентгенској интегралној методи гранични услови треба да проистекну из резултата, а не да буду постулирани [29].



Слика 2.7 - Прорачун заосталих напона по рентгенској интегралној методи

2.3.3.2 Метода неутронске дифракције

Код неутронске дифракције поступак са неутронским зрацима је аналоган поступку код R \ddot{o} -зрака. Релативно мала апсорпција неутронског зрачења омогућује знатно већу дубину продирања зрака, тако да се она креће и до неколико центиметара. Како се код неутронске дифракције може регулисати енергија зрачења, то се тиме може одређивати и дубина продирања. Ако се метода користи за мерење напона, морају се а priori испунити гранични услови, а додатно, такође, и равнотежни услови.

Веће могућности ове методе у односу на рентгенску дифракцију су практично ограничене потребом за извором неутронског зрачења и пратећом веома скупом опремом, па се она користи само тамо где, због дубине продирања, рентгенска дифракција не може дати резултат.

2.3.3.3 Ултразвучна метода

Код ултразвучног испитивања таласи продиру у материјал, а напони мењају њихову брзину и трајање. Најчешће се мери време простирања два међусобно нормална трансверзална таласа. Ако се елиминише утицај текстуре, могу се

одредити константе затезног или притисног напона, а посебно измерити диференцијал главних напона, што је примењиво у вијчаним и завареним спојевима. Са малим пречником звона и ограниченом дивергенцијом могуће је методу применити аналогно Рентгенској интегралној методи.

Ултразвучна метода, мада теоријски добро обрађена, још увек нема довољан број потврђених резултата у пракси. Њена досадашња примена је показала мали утицај величине и облика кристала, али је истовремено потврдила изразиту осетљивост на појаву текстуре. Текстура заобљава пикове и повећава њихову ширину, па је самим тим тешко одредити положај максимума. Имајући у виду да је максимално померање Браговог угла услед дејства заосталих напона око $0,1^\circ$, то је разумљиво да ће и поступак одређивања максимума имати ограничену прецизност. Да би се раздвојио утицај текстуре од утицаја заосталих напона, потребно је вршити додатна мерења ултразвучне апсорпције или ултразвучне дисперзије.

2.3.4 Избор метода мерења

Сагледавајући применљивост наведених метода на металне елементе добијене извлачењем, проистекло је опредељење за експериментално коришћење метода рентгенске дифракције применом $\sin^2 \psi$ поступка, као методе без разарања, и методе дифлекције, као методе са разарањем.

Метода рентгенске дифракције показала је своје погодности у односу на остале у следећем:

- обезбеђује одговарајућу тачност, уз истовремену једноставност поступка и релативно ниску цену самих мерења;
- постоји велики број резултата из примене ове методе који је доступан, а таква висока заступљеност у литератури пружа могућност компарације и оцене резултата који се добијају;
- апаратура за коришћење ове методе је веома доступна у истраживачким јединицама у Европи;
- поступак мерења омогућује директно коришћење мерних резултата, тј. измерене вредности се користе у прорачунима напона који су засновани на теоријски егзактним релацијама (без посредних релација);
- опасност при раду је мала - нема посебних мера заштите, уз напомену да постоје и преносни апарати који омогућавају мерења на лицу места.

Код методе дифлекције је карактеристично следеће:

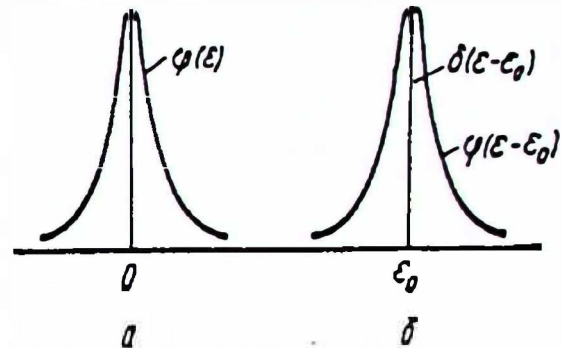
- применљива је на реалном металном елементу, што подразумева анизотропни материјал са свим грешкама и ефектима претходне обраде. Тиме су величине, узете као средње вредности, потпуно прилагођене могућем реалном ефекту заосталих напона на целокупном попречном пресеку металног елемента;
- због комплексне припреме и коначног ефекта на испитиваном узорку (разарање), метода је релативно скупа, али објективност слике коју она пружа чини њену примену потпуно оправданом.

2.3.4.1 Методе рентгенске дифракције

Иако се о рентгенској методи говори као о методи за мерење напона, не треба губити из вида да се стварно ради о мерењу деформација (тзв. рентгенској тензометрији), а да се за прелаз са деформација на напоне користи Хуков закон. Подаци о деформацији добијају се из одговарајућих рентгенских (дифракционих)



слика. За правилно разумевање, треба поћи од тога да се деформисано стање узорка карактерише помоћу функција расподеле деформације $\varphi(\epsilon)$ чији је смисао да величина $\varphi(\epsilon) \cdot d\epsilon$ одговара уделу у запремини узорка у коме деформација лежи у интервалу $(\epsilon, \epsilon + d\epsilon)$. У општем случају, деформације могу бити представљене као на слици 2.8, па се ефективна расподела $\varphi(\epsilon - \epsilon_0)$ добија као сложена функција таласне функције $\varphi(\epsilon)$ и делта-функције $\delta(\epsilon - \epsilon_0)$ постављене у тачки ϵ_0 , односно $\varphi(\epsilon - \epsilon_0) = \varphi(\epsilon) * \delta(\epsilon - \epsilon_0)$. Ако се не узму у обзир остали фактори, може се закључити да се дифракциони максимум понаша као функција $\varphi(\epsilon - \epsilon_0)$, тј. да мења облик према функцији $\varphi(\epsilon)$ и помера се по функцији $\delta(\epsilon - \epsilon_0)$. То значи да се подаци о $\varphi(\epsilon)$ могу добити из анализе облика рентгенских линија, а информација о $\delta(\epsilon - \epsilon_0)$ из анализе њихових померања. Тако ће, практично, до померања линија доћи када се, у читавој запремини која учествује у настанку дифракционе слике, јави константна деформација која износи - ϵ_0 . У физичком смислу, величина ϵ_0 представља макродеформацију, односно деформацију која је изавана дејством макронапона.



Слика 2.8 - Дифракционе слике:
а - без макродеформација и
б - са макродеформацијом ϵ_0

Рентгенска тензометрија је заснована на појави да рентгенски снап који пада на површину узорка продире на неку дубину h_{eff} која је, у случају пада зрака нормално на раван, по реду величине једнака μ^{-1} (где је μ линеарни коефицијент апсорпције рентгенских зрака). Према закону Браг-Вулфа до дифракције долази када је испуњен услов:

$$2d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \quad (2.4)$$

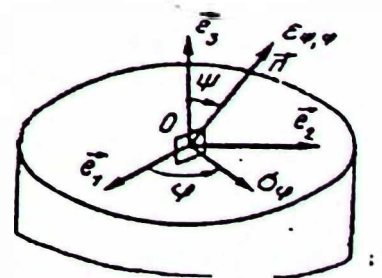
Ако се у правцу нормале на посматрану раван појави компонента деформације $\epsilon = \delta d / d$, Брагов угао постаје $\theta + \delta \theta$, па је:

$$2d(1 + \epsilon) \cdot \sin(\theta + \delta \theta) = n \cdot \lambda \quad (2.5)$$

Из једначина (2.4) и (2.5) након сређивања добија се израз за деформацију у правцу нормале на посматрану раван, у општем случају $\bar{n}(\varphi, \psi)$:

$$\epsilon(\bar{n}) = \epsilon_{\psi, \varphi} = -\operatorname{ctg} \theta \cdot (\theta_{\psi, \varphi} - \theta_0) = -\operatorname{ctg} \theta \cdot \delta \theta \quad (2.6)$$

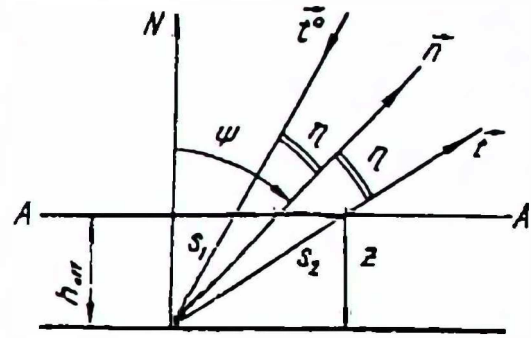
Углови ψ и φ приказани су на слици 2.9, θ_0 - представља положај дифракционих линија у узорку без деформације, а $\theta_{\psi, \varphi}$ - положај дифракционих линија код узорка са деформацијом (са заосталим напонима). Вектор \bar{n} је усмерен по бисектриси угла који образују упадни и дифрактовани зрак и који је једнак 2η , при чему је, такође, $\eta = 90^\circ - \theta$ (слика 2.10).



Слика 2.9 - Карактеристични углови и правци код рентгенске дифракције

Код метала и уобичајено примењених материјала дужина продирања зрака h_{eff} креће се око неколико микрометара.

У даљем разматрању деформацију у правцу нормале можемо приказати у радном координатном систему $\{\bar{e}_i\}$ (слика 2.9) у облику:



Слика 2.10 - Положај вектора нормале на раван рефлексије

$$\varepsilon(\bar{n}) = n_i n_j \varepsilon_{ij}; i, j = 1, 2, 3 \quad (2.7)$$

где се подразумева сабирање са понављањем индекса. Како су координате вектора \bar{n} једнаке: $n_1 = \sin \psi \cos \varphi$, $n_2 = \sin \psi \sin \varphi$ и $n_3 = \cos \psi$, то се развијањем збира и заменом добија:

$$\varepsilon_{\psi, \varphi} = \varepsilon(\bar{n}) = \sin^2 \psi \cos \varphi \cdot \varepsilon_{11} + \sin^2 \psi \sin^2 \varphi \cdot \varepsilon_{22} + (1 - \sin^2 \psi) \cdot \varepsilon_{33} + \sin 2\psi \cos \varphi \cdot \varepsilon_{13} + \sin 2\psi \sin \varphi \cdot \varepsilon_{23} + \sin^2 \psi \cos 2\varphi \cdot \varepsilon_{12} \quad (2.8)$$

За ортотропан материјал који кристалише по кубној решеткии, генерализација Хуков закон добија следећи матрични облик:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{12} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{12} & s_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

где су s_{ij} - елементи матрице коефицијената еластичности. Реис је утврдио да се, полазећи од претпоставке једнаких напона за појединачне кристалите, може утврдити следећа веза између тензометријских карактеристика материјала (Јунговог модула и Поасоновог коефицијента) за раван (hkl) и елемената матрице коефицијената еластичности:

$$\frac{(1+\nu)}{E_{hkl}} = s_{11} - s_{12} - 3G(s_{11} - s_{12} - 1/2 s_{44}) \quad (2.10)$$

$$G = (h^2 k^2 + h^2 l^2 + k^2 l^2) / (h^2 + k^2 + l^2) \quad (2.11)$$

$$(\nu/E)_{hkl} = -s_{12} - G(s_{11} - s_{12} - 1/2 s_{44}) \quad (2.12)$$

Величина G представља фактор оријентације и зависи од равни рефлексије.

За изотропни материјал је $s_{44} = 2(s_{11} - s_{12})$, па коефицијенти еластичности постају:

$$s_{11} = \frac{1}{E} \quad s_{12} = -\frac{\nu}{E} \quad s_{44} = 2\frac{1+\nu}{E} \quad (2.13)$$

где је E - Јунгов модул, а ν - Поасонов коефицијент. Заменом (2.13) у (2.9), а затим (2.9) у (2.8), добија се:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\bar{n}) = \varepsilon_{\psi, \varphi} = & \frac{1+\nu}{E} [\sin^2 \psi \cdot (\sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi - \sigma_{33}) + \\ & + \sin 2\psi \cdot (\sigma_{13} \cos \varphi + \sigma_{23} \sin \varphi)] - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \frac{\sigma_{33}}{E} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Ако је оса \bar{e}_3^p управна на површину узорка и ако је истовремено једна од главних оса тензора деформације, то осе \bar{e}_1^p и \bar{e}_2^p леже у равни која је одређена површином узорка и која садржи тачку 0 (слика 2.9). Ако су то уједно и осе главних напона $\sigma_{11}^p = \sigma_1$, $\sigma_{22}^p = \sigma_2$, уз истовремено $\sigma_{33}^p = \sigma_3 = 0$, то ишчежавају недијагоналне компоненте тензора напона, а формула (2.12) добија облик:

$$\varepsilon_{\psi, \varphi} = \frac{1+\nu}{E} \sin^2 \psi \cdot \sigma_{\psi} - \frac{\nu}{E} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.15)$$

где је $\sigma_{\psi} = \sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi$ нормалан напон који делује на плочу у нормалном правцу ($\psi = 90^\circ, \varphi$).

Ако се узме у обзир једначина равнотеже за правац \bar{e}_3 :

$$\frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} = 0 \quad (2.16)$$

и претпостави да је оса \bar{e}_3 правац главних напона, тада је $\sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$, али је и $\partial \sigma_{33} / \partial x_3 = 0$. Како је и на површини елемента $\sigma_{33} = 0$, то значи да је и у дубини $\sigma_{33}^p = \sigma_3 = 0$, односно да се ради о раванском напонском стању које је описано једначином (2.15).

Саш-Вичов поступак

Полазећи од (2.15), и имајући у виду да је \bar{e}_3 главна оса, као да је и $\sigma_3 = 0$, добија се:

$$\varepsilon_3 = -\frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.17)$$

па се преуређењем добија да је:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = -\frac{E}{\nu} \cdot \varepsilon_3 = -\frac{E}{\nu} \left(\frac{d_1 - d_0}{d_0} \right) \quad (2.18)$$

На овај начин може се добити вредност униаксијалног напона површине као суме два главна напона, тако што се из два рентгенска мерења једном на узорку без напона, а други пут на узорку са напоном одреде d_0 , односно d_1 .

Приближни поступак

Једначина (2.15) се уз помоћ (2.17) може приказати као:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\varepsilon_{\psi, \varphi} - \varepsilon_3}{\sin^2 \psi} \cdot \frac{E}{1 + \nu} \quad (2.19)$$

где је:

$$\varepsilon_{\psi, \varphi} - \varepsilon_3 = \frac{d_{\psi, \varphi} - d_0}{d_0} - \frac{d_1 - d_0}{d_0} = \frac{d_{\psi, \varphi} - d_1}{d_0} \quad (2.20)$$

при чему је: d_0 - атомско растојање у неоптерећеном стању; d_1 - атомско растојање у оптерећеном узорку нормално на површину; $d_{\psi, \varphi}$ - атомско растојање дефинисано угловима ψ и φ .

Коришћење ове једначине је, углавном, повезано са могућношћу апроксимације вредности d_0 са d_1 у имениоцу израза (2.20), зато што ова замена омогућује поједностављење експерименталне процедуре чинећи непотребним мерења на неоптерећеним елементима. Тада се за било коју орјентацију/угао азимута φ користи једначина:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{d_{\psi, \varphi} - d_1}{d_1} \cdot \frac{E}{1 + \nu} \cdot \frac{1}{\sin^2 \psi} \quad (2.21)$$

Број мерења који је потребно извршити зависан је од информација које су на располагању. За било који угао азимута уобичајено је направити две експозиције да би се одредио напон у φ -правцу. Једна експозиција се прави нормално на површину ($\psi = 0$) за добијање d_1 , а друга за исти угао φ , али за узорак који је нагнут под углом ψ (слика 2.9). Најчешће се за одређивање величине $d_{\psi, \varphi}$ користи угао $\psi = 45^\circ$.

Ако су, пак, правци два главна напона σ_1 и σ_2 познати (у случају каљења или пластичне деформације), тада је довољно да се направе само три експозиције да би се утврдило стање напона у једној тачки на површини. Првим мерењем (нормално на површину) одређује се d_1 , другим - за $\psi = 45^\circ$ у правцу φ_1 - напон σ_1 , и трећим за $\psi = 45^\circ$ у правцу φ_2 - напон σ_2 . Ако се захтева правац и интензитет σ_1 и σ_2 напона, тада је потребно вршити четири експонирања; једно у нормалном правцу и три остала у правцу три азимута. То се најчешће ради за вредности $\varphi, \varphi + 60^\circ, \varphi - 60^\circ$ и за угао $\psi = 45^\circ$, што омогућава да се на основу познатих релација одреде правци и интензитети главних напона.

Поступак (техника) $\sin^2 \psi$

Ако се у једначини (2.15) $\varepsilon_{\psi, \varphi}$ замени према једначини (2.6), добија се:

$$-\operatorname{ctg} \theta \cdot \delta \theta = \frac{1 + \nu}{E} \cdot \sin^2 \psi \cdot \sigma_{\varphi} - \frac{\nu}{E} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.22)$$

У случају обављања два мерења на узорку, и то за исти азимутни угао (φ), али за два различита угла ψ_1 и ψ_2 , те замене резултати сваког мерења у једначину (2.22) и изврши одузимање једначине за друго мерење од једначине за

прво, после сређивања, добија се:

$$\sigma_{\psi} = -\operatorname{ctg}\theta \cdot \frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{\theta_{\psi_2} - \theta_{\psi_1}}{\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1} \quad (2.23)$$

Ако се утврди зависност $\partial\theta/\partial\sin^2\psi$, тада се претходна једначина своди на:

$$\frac{\partial\theta}{\partial\sin^2\psi} = -\operatorname{tg}\theta \cdot \frac{1+\nu}{E} \cdot \sigma_{\psi} \quad (2.24)$$

Овакав начин приказивања је веома повољан јер се не захтева познавање угла дифракције неоптерећеног материјала - θ_0 , већ је, уз познате тензометријске карактеристике материјала (E, ν), потребно утврдити само зависност θ од $\sin^2\psi$. Уколико се познаје вредност d_0 , једначина (2.24) се може исказати у форми:

$$\sigma_{\psi} = \frac{\partial d}{\partial\sin^2\psi} \cdot \frac{E}{1+\nu} \cdot d_0 \quad (2.25)$$

У случају када је ова зависност линеарна, задатак се своди на одређивање нагиба праве у $(\theta - \sin^2\psi)$ или $(d - \sin^2\psi)$ дијаграму. Међутим, треба уочити да се линеарност остварује само у случају када се правац нормале на површину узорка поклапа са правцем главног напона (што произлази и из једначине (2.14)), као и уз услов да је $\partial\sigma_{ij}/\partial z = 0$ (где је z - правац нормале на површину узорка). Основни разлог за појаву нелинеарности у овој релације лежи у еластичној и пластичној анизотропији кристалита која нарушава понашање по статистичкој расподели, обзиром да код текстурираних материјала постоје преферентни правци у кристалитима [30].

Општи поступак

Поступак постаје изразито сложенији у случају када нормала на површину узорка у тачки мерења није главна оса тензора деформација (и напона). У најопштијем случају, када је систем главних оса $\{\vec{e}^p\}$ нагнут у односу на лабораторијски систем оса $\{\vec{e}_i\}$, све три главне координате нису једнаке нули и њихово одређивање је немогуће без познавања угла дифракције неоптерећеног материјала θ_0 , обзиром да чак и за раванско напонско стање зависност $\epsilon_{\psi,\varphi} = f(\sin^2\psi)$ постаје нелинеарна. Поступак, који је разрађен у [31], заснован је на једначини (2.14). Мерењем деформације $\epsilon(\vec{n})$ у шест различитих праваца (одабраних тако да се систем не трансформише у нулу), могу се добити шест непознатих координата тензора напона.

Конкретна процедура се састоји у одређивању величина:

$$a_1 = \frac{\epsilon_{\psi,\varphi}^+ + \epsilon_{\psi,-\varphi}^-}{2} = [\epsilon_{11} \cos^2 \varphi + \epsilon_{22} \sin^2 \varphi - \epsilon_{33} + \sin 2\psi \cdot \epsilon_{12}] \cdot \sin^2 \psi + \epsilon_{33}$$

$$a_2 = \frac{\epsilon_{\psi,\varphi}^+ - \epsilon_{\psi,-\varphi}^-}{2} = [\epsilon_{13} \cos \varphi + \epsilon_{23} \sin \varphi] \cdot \sin^2 \psi,$$

па се за карактеристичне углове φ добијају следеће вредности извода по $\sin^2\psi$:

Табела 2.5 - Вредности $\partial a_1 / \partial \sin^2 \psi$ и $\partial a_2 / \partial \sin^2 \psi$ за $\varphi = 0; 45^\circ$ и 90°

	$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 90^\circ$	$\varphi = 45^\circ$
$\partial a_1 / \partial \sin^2 \psi$	$(\epsilon_{11} - \epsilon_{33})$	$(\epsilon_{22} - \epsilon_{33})$	$1/2(\epsilon_{11} - \epsilon_{33}) + 1/2(\epsilon_{22} - \epsilon_{33})$
$\partial a_2 / \partial \sin^2 \psi$	ϵ_{13}	ϵ_{23}	$\sqrt{2}/2 \cdot (\epsilon_{13} + \epsilon_{23})$

Из овог система једначина се одређује свих шест компоненти тензора деформација, а затим се прелази на координате тензора напона помоћу једначине:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left[\epsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}) \right] \quad (2.26)$$

где је $\delta_{ij} = 1$ за $i = j$, односно $\delta_{ij} = 0$ за $i \neq j$.

Одређивање d_0

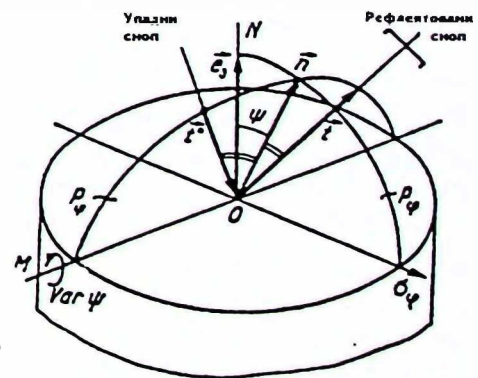
У случајевима када се вредност θ_0 не може одредити на неоптерећеном узорку, може се користити "меко" (слабопродирнуће) зрачење код кога се на дубини продирања μ^{-1} може занемарити утицај компоненти σ_{13} (усвојити постојање раванског напонског стања). Тада се, према [32], може на оптерећеном узорку узети да је $\theta_0 = \theta$ при $\psi = \psi'$ где је:

$$\psi' = \arcsin \left(\frac{\nu}{1+\nu} \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{\sigma_\varphi} \right)^{1/2} \quad (2.27)$$

За одређивање растојања у неоптерећеној решетки користи се још и поступак у коме се узорак оптерети једноосним оптерећењима различитог интензитета, а затим се за свако оптерећење нацрта права линија у $d - \sin^2 \psi$ дијаграму. У том случају пресечна тачка ових правих има координате $[\sin^2 \psi, d_0]$ [33].

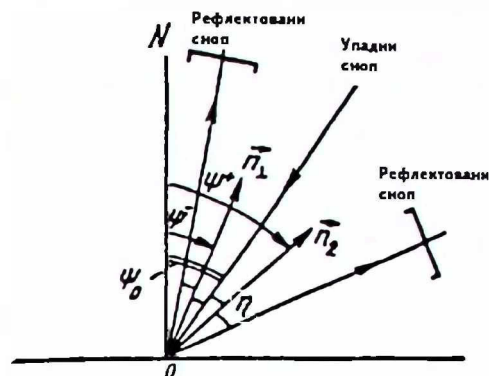
Начини регистрације дифракционих максимума

При раду са поликристалним материјалима могућ је рад у две геометрије нагињања узорка. Чешће примењивана геометрија је Ω -геометрија код које примарни зрак (\vec{t}_0) , дифрактовани зрак (\vec{t}) , вектор (\vec{n}) (у правцу кога се одређује нормална деформација $\epsilon(\vec{n}) = \epsilon_{\psi, \varphi}$), и нормала на површини узорка (\vec{ON}) леже у једној равни (слика 2.11). Предност ове методе је у могућности мерења у два правца, $\epsilon_{\psi, \varphi}$ и $\epsilon_{\psi', \varphi}$ (слика 2.12). Међутим, ова предност има и одређена ограничења,



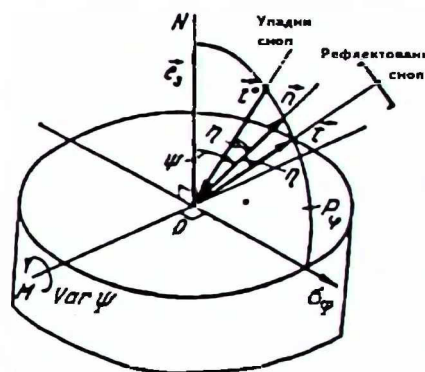
Слика 2.11 - Регистрација дифракционих максимума по Ω -геометрији

зато што је интервал њеног коришћења и варирања угла θ повезан са углом η . Како при малим угловима (реда $10-15^\circ$) нагиба уладног и дифрактованог зрака према површини елемента изразито расте слабљење сигнала, то практично значи да је $0 \leq \psi \leq 75 - 2\eta$, што онемогућава њену примену у оба правца већ за $\theta \leq 65^\circ$.



Слика 2.12 - Могућност мерења у два правца код Ω – геометрије

ψ - геометрија се, углавном, користи за мерење текстуре. У таквој геометрији нормала \bar{n} лежи у две равни; равни која садржи векторе \bar{t}_0 и \bar{t} , и равни која садржи \overline{ON} и σ_φ (слика 2.13). По тој шеми не постоје ограничења при варијацији ψ у зависности од η , пошто се мерење напона може вршити и за мале углове θ . Ово даје посебну предност код изразито деформисаног материјала (на пр. закаљени мартензитни челик), обзиром да дифракционе слике при великим угловима θ практично не постоје.



Слика 2.13 - Регистрација дифракционих максимума по ψ – геометрији

Одређивање положаја дифракционих линија

Одређивање угла θ се врши дефинисањем највећег интензитета ("лика") са рентгенограма. Главну тешкоћу за утврђивање стварног положаја θ представља појава "ширења пикова". Ширење линија рентгенограма у околини максимума настаје као резултат суперпозиције више ефеката [34,35]. Полуширина једне такве фигуре ("полуширина пика") се може дефинисати на следећи начин:

$$\beta = \beta_{instr} + \beta_{fz} \quad (2.28)$$

где је β - полуширина пика; β_{instr} - полуширина пика која је инхерентна самом апарату (зависи од: геометрије снопа зрачења, карактеристика зрачења,...); β_{fz} - полуширина која је последица физичких својстава и стања материјала. При томе је:

$$\beta_{fz} = \frac{\lambda}{D \cdot \cos \theta} + \frac{4\bar{\sigma}_{micro}}{E_{hkl}} \cdot \tan \theta \quad (2.29)$$

односно

$$\frac{\beta_{fz} \cdot \cos \theta}{\lambda} = \frac{1}{D} + \frac{4\bar{\sigma}_{micro}}{\lambda E_{hkl}} \cdot \sin \theta \quad (2.30)$$

где су: λ - таласна дужина зрачења, D - пречник зрна; $\bar{\sigma}_{\text{micro}}$ - средња вредност микронапона; E_{hkl} - Јунгов модул за раван рефлексије (hkl) [36].

За одређивање положаја линије $\theta_{\psi, \varphi}$ може се користити више репера. У том својству могу се појавити θ_{max} - угао који одговара максималном интензитету линије, $\theta_{1/2}$ - угао који одговара средини сечице повучене паралелно линији фона, и $\langle \theta \rangle$ - положај центра тежишних линија.

При раду са раширеним линијама чија је ширина већа од неколико степени, целисходно је увести поправку за факторе Лоренца L и поларизације P . Ако се примењује и Ω - геометрија, неопходно је узети у обзир и фактор апсорпције A [37]:

$$LPA = \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \theta} \cdot (1 - \text{tg } \psi \cdot \text{ctg } \theta) \quad (2.31)$$

Осим тога, код изразито развучених линија, потребно је узети поправку за фон, одузимајући ординате интензивности линија од линеаризоване у одређеним интервалима θ - линије фона. У том случају, када се испитује троосно напонско стање, потребно је познавање угла дифракције неоптерећеног узорка који, по правилу, даје оштре линије са добро раздвојеним дублетом, па се онда врши корекција за θ_{max} који потиче само од $K\alpha$ - дублета. Ова поправка није неопходна ако се одређује положај центра тежишних линија, што је свакако чини пожељном у односу на остале поменуте методе.

У последње време доста се користи метода параболе, тако што се дифракциони сигнал апроксимира параболом користећи 3, 5 или више тачака са рентгенограма, па се одређује положај темена такве параболе. Резултати по овој методи показали су највећу тачност [38,39,40].

Приликом одређивања угла θ мора се водити рачуна и о одређеним геометријским одступањима у току мерења, а која утичу на крајњи резултат. Уколико снап рентгенских зрака пада на закривљену површину, долази до промене растојања између узорка и детектора и појаве геометријске аберације. То доводи до дефокусирања, које је потребно на одговарајући начин кориговати. Иако постоји рачунски метод за ову корекцију, много се чешће користи експериментални који се састоји у нашошењу на делу површине узорка слоја неког другог материјала који је извесно без заосталих напона.

Ограничења примене методе рентгенске дифракције

Главна ограничење методе јесте могућност одређивања напона у слоју који износи свега неколико микрометара испод површине узорка. У вези са тим остаје и питање колико измерени напони у површинским слојевима могу да одразе и стање напона у дубљим слојевима.

Такође, и могућност читавања угла θ са рентгенограма понекад може бити озбиљно отежана. У случајевима када се ради о релативно великим димензијама зрна ($D > 10^{-6}$ cm) појављује се "тестераст" рентгенограм, код кога је тачност читавања значајно смањена. Сама технологија претходне обраде може да створи тешкоће код коришћења ове методе, као на пример код закаљених челика где се мора ићи на мале углове снимања, што за собом повлачи смањење тачности мерења [41].

2.3.4.2 Метода дифлекције

У делу 2.3.2 су наведени општи принципи и применљивост метода дифлекције. Детаљи о припреми узорка и начину извођења експеримената код вучења шипки ће бити дати касније у опису методе. Уједно ће се дати и прилагођени поступак за извођење релација на основу којих се прорачунавају напони. Значајно је напоменути да је у радовима Пајтера наведена толерантна грешка од 5 % код адекватног односа полупречника и дужине ($L = 10 R$) [42].

2.4 ЕФЕКТИ УТИЦАЈА ЗАОСТАЛИХ НАПОНА

Да би се правилно сагледао утицај заосталих напона на понашање констукционог елемента у реалним условима, потребно је извршити моделирање таквог елемента (увођењем одговарајућих апроксимација), а затим посматрати понашање таквог модела који је подвргнут спољашњим утицајима.

2.4.1 Модел утицаја заосталих напона

Модел полази од једноосног стања заосталих напона код цилиндричног штапа. Након већине поступака завршне припреме (обрада деформацијом, површинска и термичка обрада) успоставља се режим заосталих напона где су напони једног знака на површини (P), а супротног знака у језгру (J). У првом приближењу може се узети да на површини владају константни притисни напони (σ_{ZN}^P), а у језгру - константни затезни напони (σ_{ZN}^J) [43].

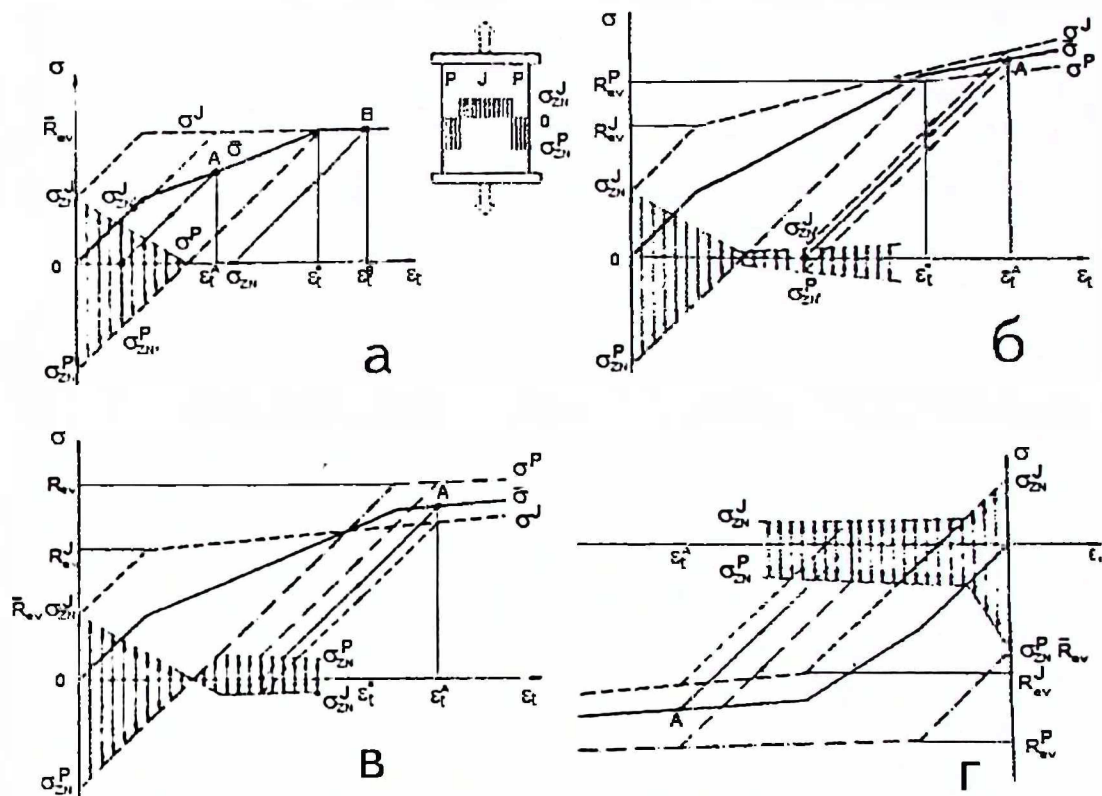
За даље разматрање потребно је увести претпоставке о пластичном понашању елемента. Ако се претпостави да површина и језгро имају исту границу течења, као и да је материјал идеално пластичан, наступа ситуација која је приказана на слици 2.14а. Напони на површини - σ^P , у језгру - σ^J , као и средњи напон - $\bar{\sigma}$, се линеарно повећавају са издужењем ϵ_i . Језгро, због затезног напона, брже достиже границу течења него површина комада која је изложена притисним напонима. Значи да пластична деформација почиње прво у језгру. Ако се комад растерети при $\epsilon_i < \epsilon_i^*$, то ће се у њему заостали напони смањити. Ово смањење наступа када напонско оптерећење $\bar{\sigma}$ достигне границу течења везе - \bar{R}_{ev} :

$$\bar{\sigma} = \bar{R}_{ev} = R_{ev} - \sigma_{ZN}^J \quad (2.32)$$

Напони на површини и језгру се смањују линеарно при даљој деформацији са растућим укупним издужењем. Изнад $\epsilon_i = \epsilon_i^*$ деформише се пластично цела запремина при константном напону течења $\bar{\sigma} = \bar{R}_{ev} = \sigma^P = \sigma^J$. Након растерећења не јављају се више макронапони [44,45]. Критично издужење се израчунава из максималне еластичне деформације ивице на основу Хуковог закона:

$$\epsilon_i^* = \frac{R_{ev} + |\sigma_{ZN}^P|}{E} \quad (2.33)$$

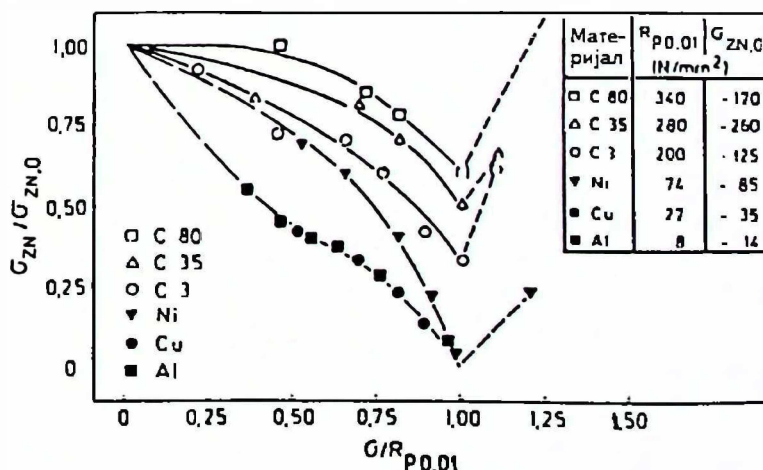
Ако језгро и површина ојачавају при истој граници течења и са истим прираштајем, то више није могуће потпуно уклањање заосталих напона. Код



Слика 2.14 - Поједностављени модели за утицај заосталих напона на особине конструкционих елемената

достигнутих високих деформација заостали напони остају константни у језгру и на површини. Смањење заосталих напона је утолико веће уколико је мање ојачавање материјала.

Дијаграм напон - издужење на слици 2.14б, уз велика поједностављења, илуструје уклањање заосталих напона код каљених стања са слике 2.15. При томе се сматра да је граница течења на површини (R_{ev}^P) већа од границе течења у језгру (R_{ev}^J) због ојачавања дислокацијама у процесу каљења, с тим што је даље ојачавање на површини мање него у језгру при константном порасту ојачавања. Оптерећење и растерећење у области $\epsilon_i < \epsilon_i^*$, доводе до смањења заосталих напона са порастом укупног издужења. Пошто се криве ојачавања на површини и у језгру не укрштају, заостали напони се само делимично уклањају. Изнад ϵ_i^* се напони



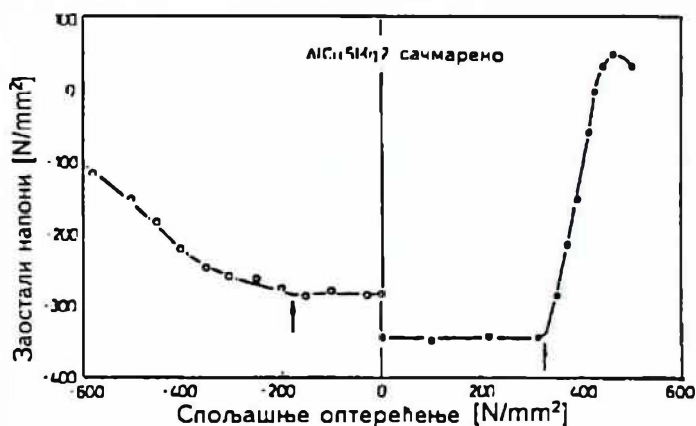
Слика 2.15 - Зависност односа σ_{ZN}/σ_{ZN0} и $\sigma/R_{p0.01}$ код ровск метала

на површини и у језгру опет повећавају на основу разлике у ојачавању површине и језгра.

Понашање заосталих напона насталих сачмарењем (слика 2.16 и 2.17) под дејством затезних напона је приказано на слици 2.14в у дијаграму напон - деформација. Изузев веће границе течења на површини, које доводе до пресека кривих за језгро и површину, важе исте претпоставке као у претходном случају. Почетак пластичне деформације одређује језгро. Тада се једначина (2.32) модификује у облик

$$\bar{R}_{ev} = R_{ev}^J - \sigma_{ZN}^J \quad (2.34)$$

Након достизања укупног издужења ϵ_i^* и растеређења, првобитни напони се потпуно уклањају. Изнад ϵ_i^* , због нехомогене деформације површине и језгра, настају деформациони заостали напони и то затезни на површини, а притисни у језгру. Аналогно, треба схватити смањење заосталих напона настало при оптерећењу притискивањем. На слици 2.14г дате су исте вредности за σ_{ZN}^P и σ_{ZN}^J , као и R_{ev}^P и R_{ev}^J , као на слици 2.14в и одговарајући дијаграм напон - деформација. Тада пластична деформација настаје на површини и то када је

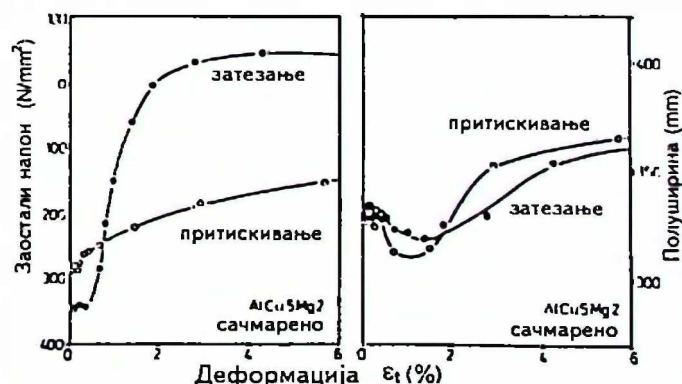


Слика 2.16 - Зависност заосталих напона код сачмарене легуре AlCu 5 Mg 2 од спољашњег оптерећења

$$\bar{R}_{ev} = R_{ev}^P - \sigma_{ZN}^P \quad (2.35)$$

Смањење заосталих напона се одвија само делимично за разлику од случаја код затезног напона. Ови резултати се квалитативно слажу са сликама 2.16 и 2.17.

Ако се смањење заосталих напона анализира код поступка са затезањем и притискивањем, онда се код границе течења језгра R_{ev}^J и код познатих рентгенографских и механичких карактеристика повезаних са границама течења при



Слика 2.17 - Зависност заосталих напона од деформације код сачмарене AlCu 5Mg 2 легуре

затезању - $\bar{R}_{ev,z}$ и притискивању - $\bar{R}_{ev,p}$, може добити удео површине ојачаног слоја - A^P на основу једначине (2.34), односно једначине (2.35). Тако се, на пример за случај затезања, удео површине ојачаног слоја изводи из важећих услова равнотеже макронапона:

$$\sigma_{ZN}^P \cdot A^P + \sigma_{ZN}^J \cdot A^J = 0 \quad (2.36)$$

при чему, са допунским условом $A^P + A^J = 1$ (A^P, A^J су одговарајући удели површина пресека у укупном попречном пресеку), добија се:

$$A^P = \frac{\sigma_{ZN}^J / \sigma_{ZN}^P}{1 - \sigma_{ZN}^J / \sigma_{ZN}^P}$$

односно са (2.34) као

$$A^P = \frac{\left(R_{ev}^J - \bar{R}_{ev,z} \right) / \sigma_{ZN}^P}{1 - \left(R_{ev}^J - \bar{R}_{ev,z} \right) / \sigma_{ZN}^P} \quad (2.37)$$

На основу резултата код сачмарене легуре AlCu5Mg2 (слика 2.16 и 2.17), добија се за границу течења на површини према једначини (2.35): $R_{ev}^P = 465 \text{ N/mm}^2$. Ова вредност је за 20% већа од границе течења несачмареног материјала R_{ev}^J . За ојачани део површине с притисним заосталим напонима по једначини (2.37) добија се вредност $A \approx 16\%$.

Табела 2.6 показује код затезања и притискивања, као и код промене знака напона, границу течења повезану са отпором за уклањање заосталих напона - \bar{R}_{ev} . Под претпоставком $A^P < A^J$ су, како код ојачавања површинског слоја ($R_{ev}^P > R_{ev}^J$), тако и код омекшавања површинског слоја ($R_{ev}^P < R_{ev}^J$) примењиве једначине (2.34) и (2.35).

Табела 2.6 Средња граница течења \bar{R}_{ev} као отпор уклањању заосталих напона за $A^P < A^J$

СТАЊЕ МАТЕРИЈАЛА	ГРАНИЦА ТЕЧЕЊА	
	Затезно оптерећење	Притисно оптерећење
Притисни заостали напони споља, у језгру - затезни	$\bar{R}_{ev} = R_{ev}^J - \sigma_{ZN}^J$	$\bar{R}_{ev} = R_{ev}^P - \sigma_{ZN}^P$
Затезни заостали напони споља, у језгру - притисни	$\bar{R}_{ev} = R_{ev}^P - \sigma_{ZN}^P$	$\bar{R}_{ev} = R_{ev}^J - \sigma_{ZN}^J$

Реални материјали поседују сталну расподелу макронапона по попречном пресеку. Ако се површински слојеви ојачају притисним, а језгро затезним напонима, онда су σ_{ZN}^P и σ_{ZN}^J - респективни напони на површини и у језгру (слика 2.14б). Узимајући ово у обзир, могуће је, за претежно једноосно напонско стање, користити једначине (2.34) и (2.35) да би се одредио почетак уклањања заосталих

напона, односно једначину (2.33) за крај уклањања. У потоњем случају се R_{ev} замењује са R_{ev}^P , односно R_{ev}^J и $|\sigma_{ZN}^P|$ са $|\sigma_{ZN}^J|$. Уклањање заосталих напона са затезним (притисним) оптерећењем почиње за $\sigma_{ZN}^J > 0$ ($\sigma_{ZN}^J < 0$) у подручју $0 < |\sigma| < |R_{ev}^J|$, односно за $\sigma_{ZN}^P > 0$ ($\sigma_{ZN}^P < 0$) у подручју $0 < |\sigma| < |R_{ev}^P|$. Уклањање се завршава када се оствари услов $|\sigma_{ZN}^P| < |R_{ev}^P|$, односно $|\sigma_{ZN}^J| < |R_{ev}^J|$. Тада је, према једначини (2.33), $|\epsilon_i^*| < 2 \cdot |R_{ev}^P|/E$, односно $|\epsilon_i^*| < 2 \cdot |R_{ev}^J|/E$. Код вишеосног напонског стања заосталих напона, са напонам σ_i који делује у правцу главног напона σ_{1ZN} , смањење заосталих напона почиње када упоредни напон $\sigma_v = f(\sigma_1 + \sigma_{2ZN}, \sigma_{2ZN}, \sigma_{3ZN})$ достигне локалну границу течења R_{ev}^P . Ако се за σ_v примени услов течења по Мизесу, тада је:

$$R_{ev}^P = \sigma_v = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 + \sigma_{1ZN} - \sigma_{2ZN})^2 + (\sigma_{2ZN} - \sigma_{3ZN})^2 + (\sigma_{3ZN} - \sigma_{1ZN})^2} \quad (2.38)$$

То значи, да за исту границу течења површине и језгра ($R_{ev}^P = R_{ev}^J = R_{ev}^P$) и вредност главног заосталог напона $\sigma_{1ZN} = \sigma_{ZN}^J$, се, на основу овог услова течења, захтева већи напон σ_1 да би започело смањење заосталих напона.

Квантитативан опис понашања при смањењу вишеосних заосталих напона прве врсте, са познатом расподелом по попречном пресеку конструкционог елемента, је прилично компликован, чак и код једнодимензионих модела спољашњег оптерећења [43].

2.4.2 Експериментални резултати утицаја заосталих напона

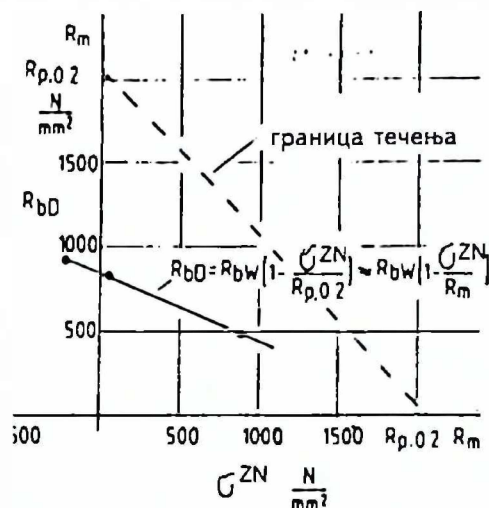
Махераух и Клос [46] направили су један критички избор резултата истраживања и (у вези са тим) оцене утицаја макронапона на понашање конструкционих елемената при статичком и динамичком оптерећењу. Табела 2.7 показује понашање конструкционог елемента од жилагог и кртог челика са утицајем заосталих напона, а у подручју пластичне деформације и лома. Граница између пластичног и кртог стања је на нивоу тврдоће од 400 HV, према [46]. Заостали напони код челика изнад поменуте границе тврдоће остају постојани при цикличном оптерећењу.

Табела 2.7 Утицај заосталих напона на промене код конструкционог елемента под статичким оптерећењем

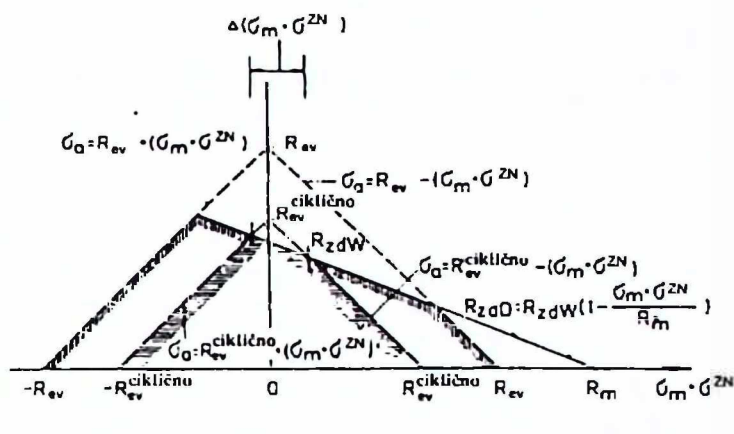
Промене елемената	жилаво стање материјала	крто стање материјала
Пластично подручје	велики утицај ЗН	велики утицај ЗН
Лом	занемарљив утицај ЗН	велики утицај ЗН

Пример утицаја величине и знака заосталих напона за Велерову криву од побољшаног и брушеног челика Ск 45 показује слика 2.18 [46]. На дијаграму на

слици 2.19 [46], код чврстоће на савијање добијена је линеарна зависност. Заостали напони (приказани као релативна вредност у односу на границу течења) показују директан утицај на трајну чврстоћу при променљивом оптерећењу на савијање. Полазећи од ових и сличних резултата, може се конструисати модификовани Хајов дијаграм [46], који приказује заостали напон као адитивну функцију средњег напона (σ_m).



Слика 2.18 - Утицај заосталих напона на Велерову криву код Ck 45



Слика 2.19 - Приказ заосталог напона као адитивне функције средњег напона код Ck 45

2.5 УКЛАЊАЊЕ ЗАОСТАЛИХ НАПОНА

Заостали напони се могу дејством механичке или термичке енергије смањити или потпуно уклонити. Еластичне деформације (издужења или скраћења) (ϵ_e), које су по Хуковом закону последица заосталих напона, могу се повољним процесима претворити у пластична издужења или скраћења (ϵ_p). Ова пластична деформација може бити остварена дејством τ -напона, што се на микро-нивоу остварује механизмима дислокационог клизања, дислокационог пузања по границама зрна и дифузионог пузања. Ако би дошло до поменуте пластичне деформације, а да се при томе не оствари ниједан од поменутих механизма, то би значило да је до смањења заосталих напона дошло услед настанка или проширења пукотина у материјалу.

На уклањање, односно смањење заосталих напона утиче велики број фактора. Поред самог стања заосталих напона, на њихово смањење утичу и: стање материјала, оптерећење, облик елемента и околина. Најпознатије методе уклањања заосталих напона су:

- загревање (отпуштање);
- једноосна деформација (развлачење, извлачење);
- наизменична (циклична) деформација.

Поред наведених метода, заостали напони се могу уклонити: трзањем, неутронским зрачењем, дејством променљивог магнетног поља, дрмањем и парцијалним разарањем објекта. За разматрање процеса уклањања заосталих

напона морају се узети у обзир технолошки узорци, па се у том смислу препознају већ наведени процеси у којима настају заостали напони, а најважније методе уклањања (загревање, једноосна и циклична деформација) се истовремено дефинишу на основним законитостима базираним на структурно-механичким механизмима.

2.5.1 Уклањање заосталих напона загревањем (отпуштањем)

2.5.1.1 Утицај температуре

Заостали напони у процесима обраде деформацијом, површинске обраде, термичке обраде или спајања елемената се уклањају у највећем броју случајева када се на температури

$$T = 0,5 \cdot T_s \text{ [K]} \quad (2.39)$$

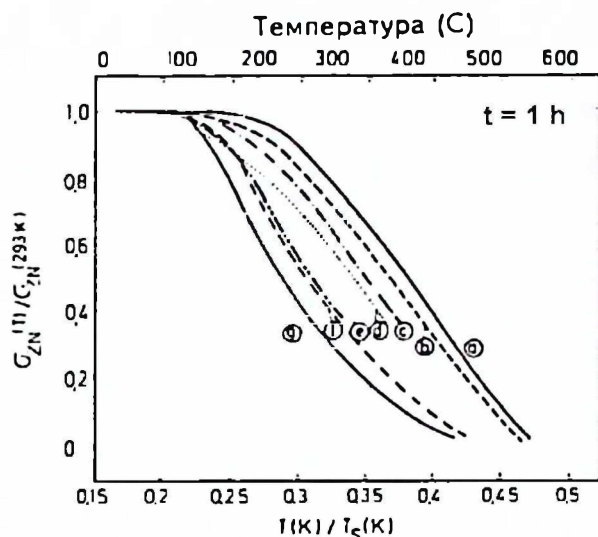
(где је T_s - температура топљења), комад држи неколико сати, а затим лагано хлади до собне температуре. Време загревања зависи највише од димензија комада и његовог стања. Како је температура од $0,5 T_s$ карактеристична за почетак зоне рекристализације, то се може очекивати да су макрозаостали напони на овој температури у потпуности уклоњени. Када је реч о микрозаосталим напонима, они се извесно снижавају, али не ишчезавају у потпуности обзиром да присутне грешке у решетки (посебно дислокације), као и различити коефицијенти дилатације структурних компоненти (фаза), обезбеђују њихово присуство. За уклањање заосталих напона меродавни су термички активни процеси код којих се температура и трајање могу мењати у одговарајућем интервалу. Да би се добио исти ефекат смањења заосталих напона код ниже температуре, потребно је повећати време загревања.

На термичко уклањање заосталих напона утиче само стање заосталих напона и стање материјала. На слици 2.20 су приказани су подаци за утицај једносатног отпуштања на уклањање заосталих напона на површини, одређених рентгенографски, код различитих врста челика. Заостали напони су, при томе, различитог порекла. Резултати на слици показују полазне напоне и напоне после уобичајеног уклањања заосталих напона (насталих каљењем) поступком загревања на 200°C . Може се уочити да материјали деформисани вучењем показују изразито мало смањење заосталих напона. Када је реч о узорцима који су површински обрађени, јавља се значајније смањење (11% код (с), 17% код (d) и 19% код (e)), и то утолико веће, уколико су веће вредности притисних напона. На слици 2.21 су приказане зависности релативног односа заосталих напона $\sigma_{ZN}(T)/\sigma_{ZN}(293\text{ K})$ од хомологне температуре загревања T/T_s . Уочава се да у свим случајевима једночасовног загревања на $0,5 T_s$ (што одговара температури око 600°C) долази до потпуног уклањања заосталих напона. Поред тога, може се

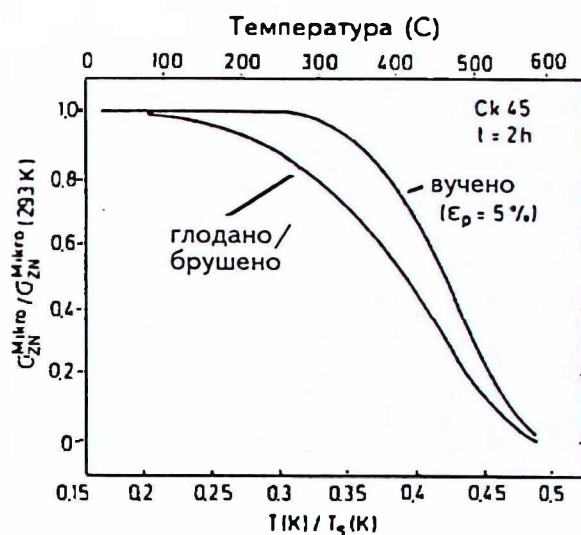


Слика 2.20 - Уклањање ЗН једносатним отпуштањем код различитих врста челика

приметити и једно карактеристично померање кривих у дијаграму у зависности од стања материјала, односно порекла заосталих напона: напони настали каљењем смањују се на нижим, напони настали при површинској обради на средњим, а напони створени при обради деформацијом на вишим температурама. Да би се, на пример, за један сат постигло исто смањење заосталих напона код деформисаног као код каљеног Ск 45, потребно је повећати температуру за око 150°C. Такође, може се закључити да повећани полазни напони у поступку каљења и површинске обраде померају криву $\sigma_{ZN} - T$ ка нижим температурама [43].



Слика 2.21 - Зависност релативног односа заосталих напона од релативне температуре отпуштања (а...г, као на слици 2.20)



Слика 2.22 - Прорачунати микронапони за брушено и каљено стање

Оцена микронапона је могућа на основу слике 2.22, где је половина ширине рентгенске интерференционе линије (у складу са подацима из [47]) коришћена за прорачун микронапона код Ск 45 за деформисано и брушено стање, и оцењиван је ефекат уклањања напона после загревања од два сата, на основу података из [47,48]. Аналогно макронапонима, напони настали брушењем отклањају се при нижим температурама од оних насталих при извлачењу. Такође, може се закључити да се код обраде деформацијом микронапони отклањају на вишим температурама у односу на макронапоне; за 50% смањења заосталих напона код вученог челика Ск 45 загревањем од једног сата потребна је приближно 100°C виша температура за микронапоне у односу на макронапоне (Табела 2.8).

На слици 2.22 недостају упоредне мерне вредности за заостале напоне настале у процесу каљења. Објашњење за њихово смањење се може наћи у раду [48] и оно је базирано на анализи помоћу рентгенске интерференције на каљеном угљеничном челику. Средња деформација решетке $\langle \epsilon^2 \rangle^{1/2}$, која је пропорционална микрозаосталим напонима, расте са порастом садржаја угљеника због повећаног броја октаедарски растворених атома угљеника у тетрагоналну просторно-центрирану кубну решетку мартензита, као и са порастом густине дислокација [23]. Њихово уклањање почиње на утолико нижој температури отпуштања уколико је већи садржај угљеника и, при томе, уклањање показује растућу брзину. Управо због овога треба очекивати да се микрозаостали напони код каљења уклањају брже и при нижим температурама од макрозаосталих напона.

Табела 2.8 Резултати испитивања добијени термичким уклањањем заосталих напона

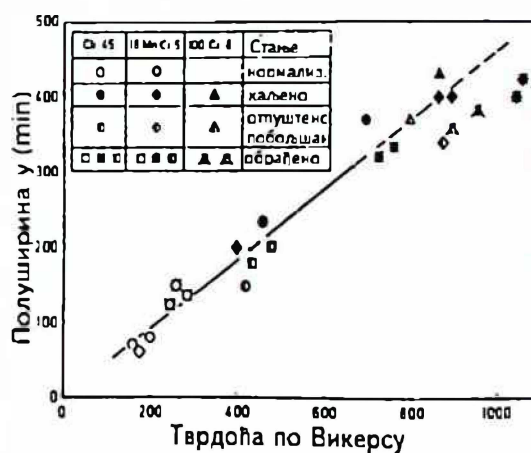
Материјал	Стање Заостали напони	$\bar{\sigma}_{ZN}(293K)$ (N/mm ²)	T(K) : 1h $\sigma_{ZN}(T)/\sigma_{ZN}(293K) = 0,5$	m	Q (eV)
Ск 45	деформисан 5% макронапони	- 150	663	0,29	1,48
	деформисан 5% микронапони	98	769	0,28	2,07
	каљено микронапони	297	520	0,26	1,15
Ск 22	деформисан 5% макронапони	- 78	644	0,29	1,31
	каљено макронапони	194	534	0,26	1,3
Ti Al 6 V 4	сачмарено макронапони	- 831	778	0,28	2,78
	сачмарено микронапони	301	802	0,36	2,79

Квалитативна представа о понашању микронапона при довођењу енергије може се добити на основу мерења полуширине рентгенске интерференције. На слици 2.22 приказани су резултати који показују већу полуширину код брушених у односу на вучене елементе [47,48]. Пошто је најчешће пораст полуширине праћен повећањем тврдоће (слика 2.23), може се за микронапоне применити иста температурна зависност као код макронапона (види слику 2.21). На основу тога, произлази да уклањање микронапона насталих термичком прерадом наступа при нижим температурама, микронапона код површинске обраде при средњим, а микронапона насталих деформацијом код високих температура.

Да би се анализирали термички активни процеси, који су битни за смањење заосталих напона, поред до сада посматраног утицаја температуре, мора бити узет у обзир и утицај времена. Ако се, при томе, фиксира однос $\sigma_{ZN}(T)/\sigma_{ZN}(293K)$, (скраћено: $\sigma_{ZN}/\sigma_{ZN,0}$), може се успоставити следећа релација између времена (t) и температуре (T):

$$t = t_0 \cdot \exp(Q/kT) \quad (2.40)$$

где су: t_0 - временска константа, k- Болцманова константа, Q- енергија активације у (t – T) интервалу.



Слика 2.23 - Однос полуширине рентгенограма и HV код челика

Подаци дати у [47] у форми $\sigma_{ZN} - \log t$ дијаграма за деформисани и каљени челик нису подесни за директну примену у једначини (2.40), већ је практичније утицај времена на уклањање заосталих напона дати преко Зенер-Аврамове функције:

$$\sigma_{ZN} / \sigma_{ZN,0} = \exp \left[- (A \cdot t)^m \right] \quad (2.41)$$

која омогућује линеаризацију. У једначини (2.41) A представља параметар који зависи од материјала и температуре

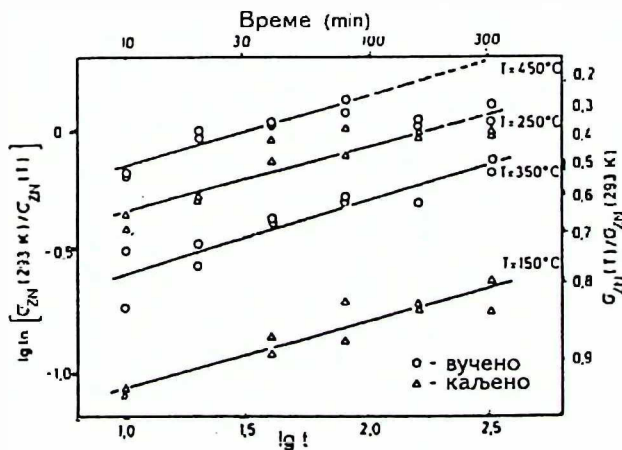
$$A \approx \exp(-Q/kT), \quad (2.42)$$

а m је бројна вредност која зависи од доминантног механизма [24,25].

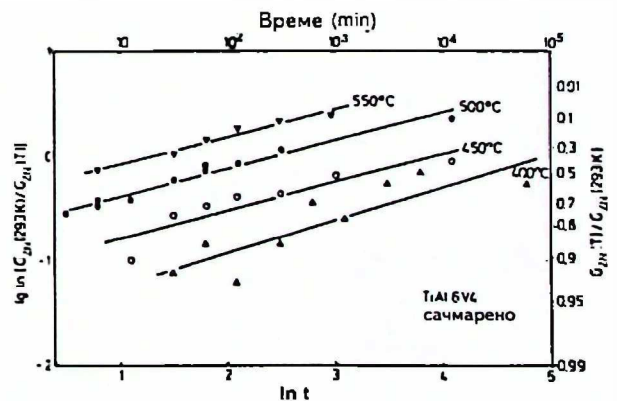
На основу једначине (2.41) следи

$$\log \ln(\sigma_{ZN,0} / \sigma_{ZN}) = m \cdot \log t + m \cdot \log A \quad (2.43)$$

тако да мерне вредности у $\log \ln(\sigma_{ZN,0} / \sigma_{ZN}) - \log t$ дијаграму треба да имају облик праве при константној температури отпуштања. Како је на слици 2.24 приказано, таква зависност се и експериментално потврђује. Нагиби правих су практично независни од температуре отпуштања, као и од стања материјала и имају средњу вредност од $m = 0,28$ (види табелу 2.8). Слика 2.25 даје вредности смањења заосталих напона у титановој легури која је била изложена сачмарењу [43], и где је нагиб независан од температуре, а његова вредност је такође $m = 0,28$.



Слика 2.24 - Утицај времена отпуштања на заостале напоне код челика Ск 45

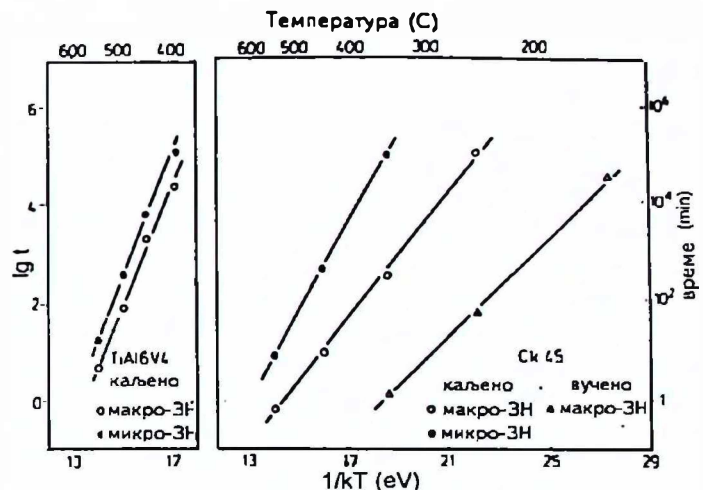


Слика 2.25 - Утицај времена отпуштања на заостале напоне код легуре TiAl 6 V 4

На основу оваквих дијаграма могу се, за $\sigma_{ZN} / \sigma_{ZN,0} = \text{const.}$, добити одговарајући параметри времена и температуре. Примери за уклањање макро и микро напона су дати на слици 2.26 у координатама $\log t - 1/kT$. Спојене тачке у десном делу дијаграма за Ск 45 у различитим стањима и левом делу дијаграма за TiAl6V4 могу се описати помоћу одговарајућих правих. За њих, на основу једначине (2.42) и (2.43), важи релација:

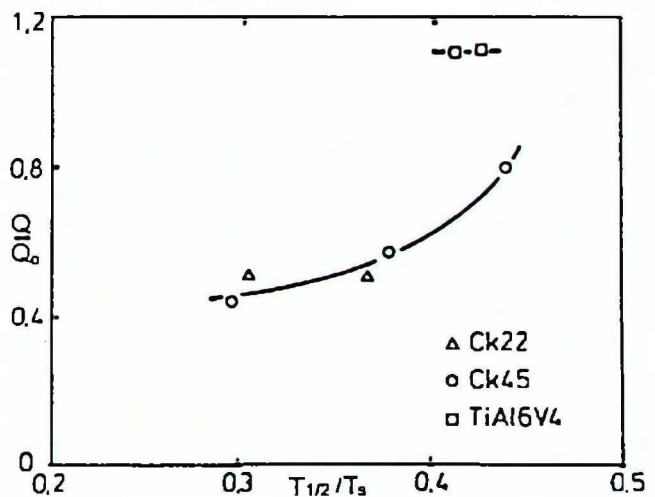
$$\log t = \text{const} + \frac{Q}{\ln 10 \cdot kT}, \quad (2.44)$$

која се након трансформације подудара са једначином (2.40). Из тога се може израчунати енергија активације потребна за уклањање заосталих напона. Као што се може видети из табеле 2.8, Q је одређено стањем материјала и код челика се креће у интервалу $1,15 \div 2,07$ eV, а код TiAl6V4 око 2,8 eV. Код челика је уклањање макрозаосталих напона насталих каљењем карактеристично по најнижој активационој енергији, док је за микрозаостале напоне добијене деформацијом потребна највиша активациона енергија. Код легуре TiAl6V4 се активационе енергије за уклањање макро и микронапона разликују незнатно. Табела 2.8 приказује $T_{1/2}$, што представља температуру при којој се за један сат отпуштања заостали напони смање на 50 % полазне вредности. Ако се узме у разматрање потребна активациона енергија, може се закључити да је код челика уклањање заосталих напона везано са више процеса који условљавају повећану активациону енергију са повећањем температуре; код TiAl6V4 је очигледно у питању само један процес.



Слика 2.26 - Дијаграми $\log t - 1/kT$ за Sk45 и TiAl 6 V4 за 50 % смањења ЗН

Активационе енергије Q , које су добијене при смањењу заосталих напона, представљене су на слици 2.27 (у односу на Q_0 активациону енергију за самодифузију или високотемпературско пузање), у зависности од хомологне температуре - $T_{1/2}/T_s$. Са $Q_0 = 2,6$ eV за α -Fe [27], и $Q_0 = 2,51$ eV за α -Ti [28], добија се однос између 0,4 и 1,1. У радовима [49,50] су експериментално добијене исте вредности, а то је објашњено присуством тешкораздвојивих поступака смањења чврстоће код уклањања заосталих напона који су зависни од материјала и стања напона.



Слика 2.27 - Зависност релативне активационе енергије од хомологне температуре за 50% смањења ЗН; $t = 1$ h

При деформацији, обради и каљењу јављају се карактеристичне промене стања. При томе су типични процеси промена густина дислокација и дислокациона несређеност.

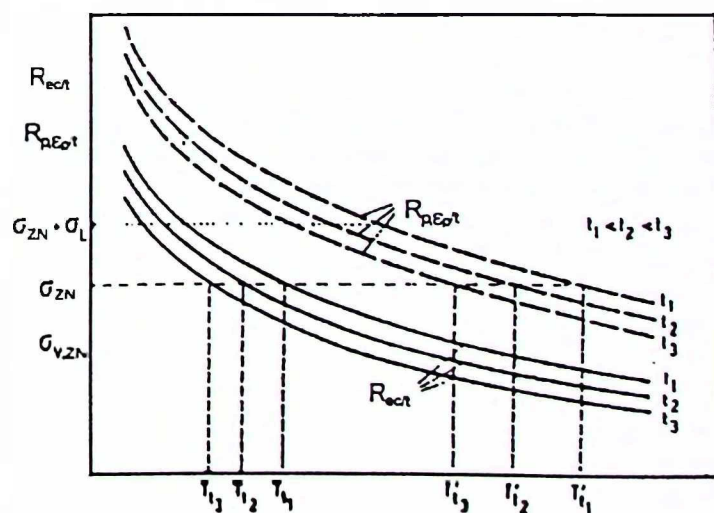
При каљењу јављају се различите неравнотежне концентрације растворених интерстицијских атома, који заједно са дислокацијама утичу на напонско поље. Ако се спроведе термичка обрада у температурној области опорављања ($T \leq 0,5T_s$), тада се дислокације преуређују у нискоенергетско стање елементарним процесима комбинованог клизања, попречног клизања и успињањем парцијалних дислокација. Код каљеног стања се врши и дифузија угљеника, која

одговара температури отпуштања и карактеристичном стварању карбида. Процес који одређује брзину смањења заосталих напона је термички активирано успињање дислокација, са изузетком раног отпуштања каљеног челика. Ако при томе дифундују атоми у језгро дислокација, тада се може очекивати активациона енергија $Q \approx 0,5 \cdot Q_0$. Када је доминантна запреминска дифузија, енергија активације је одређена активационом енергијом самодифузије. Оба процеса су реална и дешавају се истовремено али са различитим уделима. У свему томе густина и распоред дислокација имају важну улогу. Код статистичке расподеле дислокација екстремно високе густине ($\rho_1 \approx 10^{12} \div 10^{13} \text{ cm}^{-2}$), очекује се процес уклањања код кога наступа успињање парцијалних дислокација одређено дифузијом атома у језгро дислокација. Доминантна запреминска дифузија одређује процес опорављања код релативно стабилног дислокационог стања, стварањем дислокационих граница (граница субзрна, граница под малим углом). Овај процес опорављања наступа у случајевима бомбардовања куглицама титанове легуре. Случај деформисаног челика се налази између ова два екстремна случаја, а активациона енергија је, при томе, одређена уделима ова два процеса [43].

Сва ова разматрања односе се на процес опорављања где се унутрашњи напони смањују у температурном опсегу $T \leq 0,5T_s$. При томе, механичке особине као што су тврдоћа, граница течења, итд, се не мењају знатно. При рекристализационом жарењу ($T > 0,5T_s$) смањује се густина дислокација услед образовања нових зрна. То доводи до потпуног уклањања макронапона, веома малих микронапона и изразитих промена механичких карактеристика.

2.5.1.2 Отпор материјала уклањању заосталих напона

Уклањање заосталих напона углавном не наступа загревањем уколико је, при доминантно једноосном напонском стању, σ_{ZN} мање од отпора материјала пузању. Овај отпор је означен са $R_{ec/t}$, а дефинише се као $\lim_{\epsilon_p \rightarrow 0} R_{p,\epsilon_p/t}$ односно као временска граница при занемарљиво малој деформацији. $R_{ec/t}$ се смањује са повећањем температуре и времена загревања, што је шематски приказано на слици 2.28. При уклањању заосталих напона пузањем (дислокационим пузањем, пузањем по границама зрна, дифузионим пузањем) у питању је знатно краће време од пузања у техничком смислу. $R_{ec/t}$ се порастом T и/или t приближава локално највећој вредности σ_{ZN} . За $T = T_u$ је $\sigma_{ZN} = R_{ec/t}$ и тада долази до локалног пузања. Даље повећање температуре или времена праћено је мерљивим микропластичним пузањем. При томе, смањење заосталих напона почиње при утолико већим температурама T_u , уколико је краће време t , уколико је нижа вредност σ_{ZN} и уколико је већа вредност $R_{ec/t}$ (која зависи од материјала) - слика 2.28.



Слика 2.28 - Шематски приказ утицаја температуре и времена на $R_{ec/t}$; $R_{p,\epsilon_p/t}$

Промене $R_{ec/t}$ се могу постићи променом стања материјала.

Поклапање σ_{ZN} са спољашњим напонам σ_L који делује у истом правцу утиче на уклањање заосталих напона. Што је већа вредност σ_L , уколико уклањање заосталих напона почиње на нижим температурама. Спољашњи напон који делује у супротном смеру одлаже почетак микропластичне деформације. Нехомогена расподела заосталих напона омогућује да дође до суперпозиције σ_{ZN} и σ_L , те да настане локална пластична деформација. Ако спољашњи напон делује тако да са заосталим - $\sigma_{ZN,0}$ изазове микропластичну деформацију ϵ_p , заостали напон ће се смањити на σ_{ZN} , што је потпуно аналогно као код $R_{p\epsilon/t}$, слика 2.28.

За вишеосно напонско стање заосталих напона узима се упоредни напон уместо σ_{ZN} основног напона. Са компонентама главног напона $\sigma_{1,ZN}$, $\sigma_{2,ZN}$ и $\sigma_{3,ZN}$, на основу енергетске хипотезе, упоредни напон се прорачунава по формули:

$$\sigma_{v,ZN} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1,ZN} - \sigma_{2,ZN})^2 + (\sigma_{2,ZN} - \sigma_{3,ZN})^2 + (\sigma_{3,ZN} - \sigma_{1,ZN})^2} \quad (2.45)$$

Упоредни напон зависи од разлике компоненти главних напона, а оне одређују смицајни напон који делује на дислокацију у клизном систему. Уклањање напона наступа када је $\sigma_{v,ZN} \geq R_{ec/t}$, с тим што случај $\sigma_{v,ZN} > R_{ec/t}$ може да постоји само кратко јер се одмах догађа пузање и настаје услов $\sigma_{v,ZN} = R_{ec/t}$.

2.5.1.3 Утицај величине заосталих напона на њихово уклањање

Резултати приказани на слици 2.20 и 2.21 показују да је уклањање заосталих напона насталих каљењем или површинском обрадом интензивније и да почиње код нижих температура уколико је већа њихова вредност. То је последица сличних процеса који се уочавају код микропузања у тзв. примарном стадијуму. Тада, за константни напон σ важи емпиријска релација облика: [51,52]

$$\epsilon_p = B(T) \cdot \sigma^p \cdot t^q \quad (2.46)$$

где B - представља величину која зависи од температуре и стања материјала. За експоненте важи: $p \gg 1$; $0 < q < 1$. Издужење или скраћење услед пузања расте са повећањем напона и времена. Ако се узме да је укупно издужење константно, то значи да се еластично издужење претвара у пластично, па важи:

$$\frac{\sigma_{ZN}}{E} + \epsilon_p = \text{const.} = \frac{\sigma_{ZN,0}}{E}, \quad (2.47)$$

односно

$$\epsilon_p = \frac{1}{E} (\sigma_{ZN,0} - \sigma_{ZN}) \quad (2.48)$$

Ако се поставе реалне вредности $\sigma_{ZN,0}$, при потпуном уклањању заосталих напона

σ_{ZN} , могућа су пластична издужења или скраћења од свега неколико промила. То значи да деформација која настапа при уклањању заосталих напона лежи у подручју микро-издужења пузањем. Једначина (2.47) не може да се замени у једначини (2.48) због променљиве вредности $\sigma = \sigma_{ZN}$, али је из ове две релације јасно да повећање σ_{ZN} доводи до ефикаснијег смањења заосталих напона. Другим речима, већа покретачка сила доводи до померања уклањања заосталих напона ка краћем времену загревања и нижим температурама.

2.5.2. Уклањање заосталих напона пластичном деформацијом

2.5.2.1 Једносмерна деформација

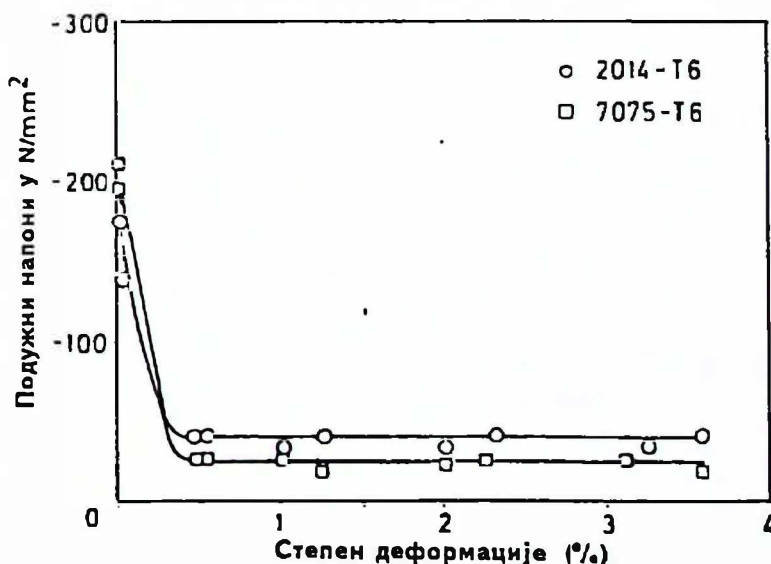
Поред отпуштања заостали напони се уклањају и једносмерном деформацијом. При обради деформацијом, заостали напони се могу смањити завршном деформацијом са малом редукцијом попречног пресека (калибрисање). Облик завршне деформације може бити и затезање, развлачење, ваљање, притискивање, исправљање, механичко полирање или сачмарење [53,54]. Ипак, ови поступци се могу применити само код једноставнијег облика комада. Код шавова на завареним спојевима једносмерна деформација има за циљ да смањи или да изазове повољнију расподелу напона, уз елиминацију пикова [55]. Након достизања одговарајуће критичне вредности, овакво оптерећење изазива промену еластично издужених елемената у пластично деформисане елементе.

Слика 2.29 показује понашање аксијалних притисних заосталих напона на површини Al-Cu-Si-Mg легуре (2014-T6) и Al-Zn-Mg-Cu легуре (7075-T6) у каљеном стању са накнадним вучењем [56]. До степена деформације од 0,5% наступа знатно уклањање заосталих напона. Они достижу такву вредност која се код даље деформације не мења.

На слици 2.30 је приказан ток заосталих напона по висини z при савијању побољшаног челика S125 са пластичном деформацијом на ивици од 0,56% [57]. Узорак је затим

исправљен са супротим моментним оптерећењем повратном деформацијом ($\Delta\epsilon_r = 0,57\%$) до визуелно правих ивица. Уочава се смањење заосталих напона на приближно једну трећину полазне вредности

Узорци каљене Al- легуре типа AlCu5Mg2 који су сачмарени куглицама показују различито понашање при оптерећењу затезним и притисним напонима.

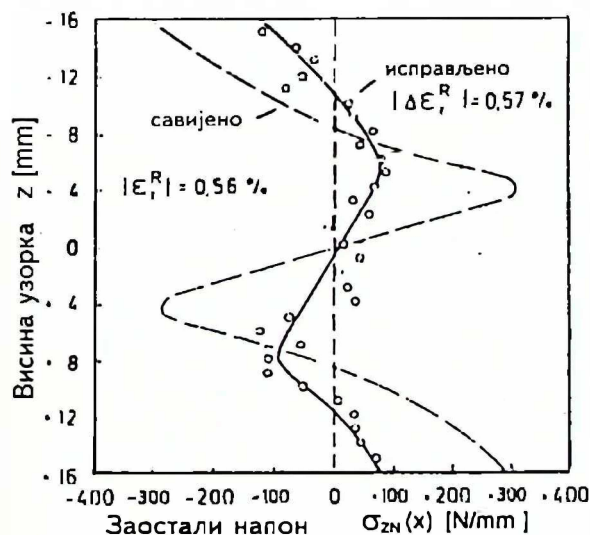


Слика 2.29 - Промена заосталих напона код AlCuSiMg-легура и AlZnMg-легура у зависности од степена деформације

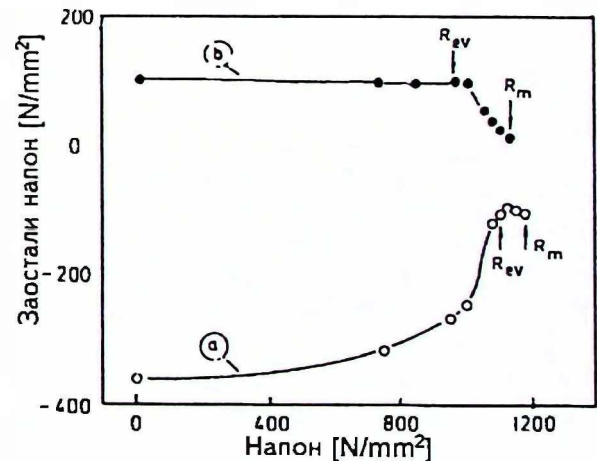
Притисни напони од око 300 N/mm^2 на површини смањују се код затезног напона од 83%, односно код притисног напона већ код 46% границе течења несачмареног материјала ($R_v = 390 \text{ N/mm}^2$). Смањење је знатно брже при затезању него при притискивању; после укупног издужења од $\epsilon \approx 2\%$ уклањање напона је потпуно (види слику 2.17). Услови ојачавања при затезању код $\epsilon > 2\%$ доводе до промене знака σ_{zn} . Код притисног оптерећења уклањање није потпуно.

Понашање заосталих напона насталих каљењем код метала са површински центрираном кубном решетком и челика при оптерећењу затезањем је приказан на слици 2.15 [58]. Релативни однос $\sigma_{zn}/\sigma_{zn,0}$ је дат у зависности од односа $\sigma/R_{p0,01}$. Када су у питању горе наведени метали дејство затезног напона до 0,01% пластичне деформације изазива брзо и потпуно уклањање заосталих напона, док је код челика то само делимично и јаче је изражено уколико је мањи проценат угљеника, а нижа граница течења.

За оцену утицаја оптерећења на заварене спојеве значајна је анализа заосталих напона насталих заваривањем и њихове стабилности под дејством спољашњег оптерећења. На примеру електролучног и WIG- заваривања мартензитног каљеног челика X2NiCoMo1885, на слици 2.31, приказано је како се затезним напона могу знатно смањити заостали напони [59,60]. Смањење код електролучно завареног узорка почиње код око $0,7R_{ev}$, где је R_{ev} - граница течења завареног споја без накнадне термичке обраде. Код WIG- завареног споја



Слика 2.30 - Ток заосталих напона по висини z при савијању побољшаног челика C125



Слика 2.31 - Уклањање заосталих напона затезањем код завареног споја челика X2NiCo Mo 1885:

a - електролучно, b - WIG- заваривање

почиње видљиво смањење заосталих напона тек изнад R_{ev} , а потпуно уклањање настаје тек достизањем затезне чврстоће R_m .

Значи, уклањање заосталих напона помоћу једносмерне деформације почиње код релативно ниског оптерећења, односно мале пластичне деформације. Оно је потпуно или само делимично што зависи од стања материјала и од врсте оптерећења. Поједностављени модел уклањања заосталих напона једносмерном деформацијом (који укључује извесне идеализације) дат је у тачки 2.4.1, пошто се

2.5.2.2 Понашање микронапона

При смањењу макро-заосталих напона једносмерном деформацијом микро-заостали напони се понашају сложено. Код обраде се јављају дислокационо изазвани, како усмерени тако и нехомогени микро-напони. Уопште, напони настају од дислокација на граничним површинама или од еластичног оптерећења друге фазе у хетерогеним материјалима. Ако код локалне пластичне деформације дође до повратног кретања дислокација, онда се локални напони, а самим тим и усмерени микронапони, смањују. Код даље деформације долази до поновног обнављања напона супротног смера повезаног са умножавањем дислокација и ојачавањем, тако да извесно долази до повећања заосталих напона.

Статистички распоред дислокација даје подстицај за нехомогене микронапоне. Микропластична деформација може и овде да подстиче дислокационо померање у енергетски повољнији положај, што значи смањење заосталих напона. Ако се стварају нове дислокације, тада код овог процеса долази до поновног стварања микронапона. У том смислу треба разумети полуширину рентгенске интерференције код сачмарене Al- легуре изложене статичком дејству силе. Код каљеног челика могућа је суперпозиција два ефекта. Са једне стране после каљења је присутна екстремно висока густина дислокација које су оријентисане у највећем делу статистички. Макропластична деформација утиче на преобликовање дислокација у формације са нижом дислокационом енергијом и тиме доводи до смањења микронапона. Са друге стране, могу у напонско поље покретне дислокације бити премештени растворени угљеникови атоми као у енергетски повољнији положај октаедарских шупљина мартензитне решетке. Они утичу на смањење тетрагоналности и тако смањују кривљење решетке изазвано раствореним угљениковим атомима [43].

2.5.2.3 Циклична деформација

Чврстоћа материјала при цикличном оптерећењу може бити знатно измењена присуством заосталих напона, а локално различити средњи напони могу да доведу до пораста заморне чврстоће, о чему сведоче бројни радови. Посебан значај, при томе, има утицај напона на структурно-механичке процесе у стадијуму цикличне деформације (али без стварања пукотине), а у вези са тим је и стабилност заосталих напона.

На слици 2.32 приказано је понашање узорка од сачмарене Al- легуре (AlCu5Mg2) која је оптерећена на наизменично савијање [61]. Макрозаостали напони на предњој и задњој страни узорка су приказани у зависности од броја циклуса до лома при три различите амплитуде напона - σ_a . У првом циклусу наступа највеће смањење заосталих напона. Оно је најизраженије код највеће амплитуде напона од $\sigma_a = 325 \text{ N/mm}^2$. У првом полупериоду интензивно се смањују напони на страни оптерећеној притисним напонима, док се у другом полупериоду сабија друга страна узорка, тако да заостали напони опадну на износ од око 200 N/mm^2 . Када је број циклуса $N > 1$, заостали напони настали сачмарањем опадају веома мало. За оба материјала приказана на слици 2.33 карактеристично је смањење заосталих напона насталих сачмарањем са порастом амплитуде напона. Релативни односи су дати на десном делу исте слике. При томе је σ_a приказана у односу на границу течења на површини при притискивању. Криве за оба материјала код прекида ($N = N_L$) се поклапају. На слици 2.33 су узете у обзир три најзначајније величине које утичу на смањење заосталих напона: граница течења карактеристична за стање материјала - R_{ev} (односно граница

течења на површини R_{ev}^p), амплитуда напона - σ_a , карактеристична за стање оптерећења и полазни заостали напони - $\sigma_{2N(0)}$.

Ако се пође од претежно једноосног стања заосталих напона, тада њихово уклањање почиње у оквиру првог циклуса ($N=1$) када амплитуда напона достигне границу течења укупног пресека материјала ($\sigma_a = \bar{R}_{ev}$). Међутим, треба приметити да су за примену у једначинама мериторне различите границе течења. Тако би за $\sigma_a < \bar{R}_{ev}^c$ требало да стање заосталих напона у првој промени остане стабилно, а да за $N>1$ смањење заосталих напона почне постепено, када се мало прекорачи циклична граница компактног пресека. Тада важи услов:

$$\sigma_a \geq \bar{R}_{ev}^c$$

За цикличну границу течења компактног пресека примењиве су једначине (2.34) и (2.35) ако се R_{ev}^j и R_{ev}^p замене одговарајућим цикличним границама течења. На основу граничних услова датих у табели 2.6 важи:

$$\bar{R}_{ev}^c = \bar{R}_{ev}^{j,c} - \sigma_{2N}^j \quad (2.49)$$

односно

$$\bar{R}_{ev}^c = \bar{R}_{ev}^{p,c} - \sigma_{2N}^p \quad (2.50)$$

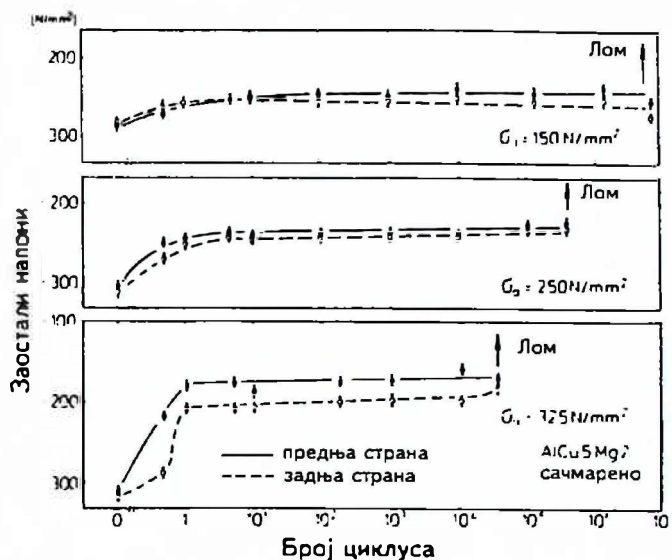
у зависности од тога да ли пластична деформација почиње прво у језгру или на површини. Уколико не дође до цикличне деформације, значи да је

$$\sigma_a < \bar{R}_{ev}^c$$

па је стање напона стабилно и код цикличног оптерећења.

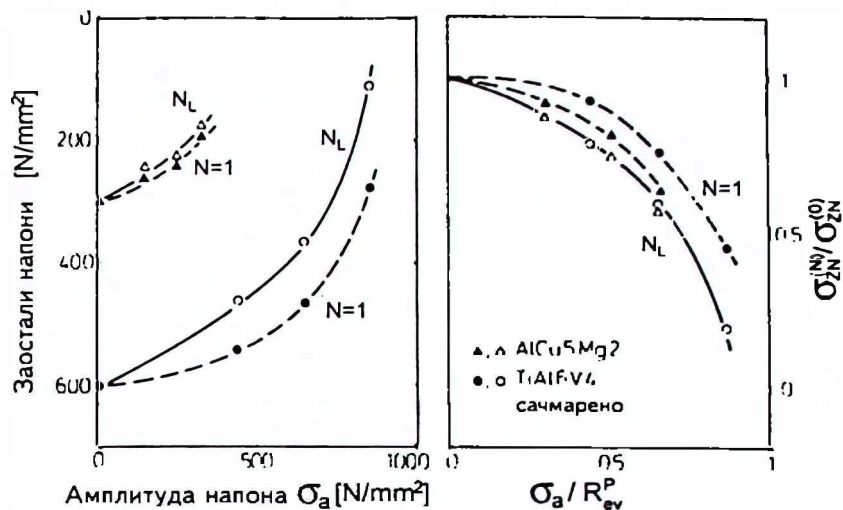
Смањење заосталих напона када је $N>1$ може се свести на цикличну пластичну деформацију. Тада се код коначног дислокационог стања ствара такав распоред који је карактеристичан за замор за дату амплитуду напона. Прерасподела дислокација је интензивна, посебно код хладно деформисаних стања и повезана са процесима наизменичног омекшавања у стадијуму замора без појаве пукотине [62,63]. Тако се у случају површинске обраде сачмарена угљеничних челика јавља максимум напона и врло велике густине дислокација ($5 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$) испод површине. Ако се ови материјали третирају на замор, долази до карактеристичног омекшавања.

На микро нивоу ово се може објаснити формирањем ћелијске структуре дислокација, код које је средња густина дислокација знатно мања [64].



Слика 2.32 - Утицај динамичког савијања на ЗН код легуре AlCu 5 Mg 2 при различитој амплитуди напона

Досада уочене разлике у понашању при уклањању заосталих напона код хладно ојачаних, површински обрађених и термички третираних материјала са цикличним оптерећењем свде се на разлике условљене прерасподелом дислокација при различитој њиховој густини. Што је сличнији распоред који настаје при замарању, утолико долази до мање прерасподеле и утолико је мање уклањање заосталих напона. [43]



Слика 2.33 - Утицај амплитуде напона при динамичком савијању на 3Н код легура AlCu 5 Mg 2 и TiAl 6 V 4

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО

3.1 МАТЕРИЈАЛ ЗА ИСПИТИВАЊЕ

За испитивање су изабрани конструкциони челици:

- за цементацију, Č.1221, Č.4121 и Č.4721;
- за обраду на аутоматима Č.3990.

Хемијски састав ових челика је приказан у табели 3.1.

Табела 3.1 Хемијски састав испитиваних челика

JUS ознака	C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Cr, %	Mo, %
Č.1221	0,12-0,18	0,40	0,30-0,60	0,035	0,035	-	-
Č.1221	0,18	0,40	0,60	0,035	0,035	0,80	-
Č.4721	0,18-0,23	0,40	0,90-1,20	0,035	0,035	1,10-1,40	0,20-0,30
Č.3990	0,08-0,14	<0,05	0,90-1,30	0,11	0,24-0,32	-	-

Поменути челици за цементацију се користе у конструкционим елементима где је потребно остварити високу тврдоћу и отпорност површине на хабање, уз задржавање жилавости у језгру. Челик Č.1221 спада у угљеничне челике за цементацију који се примењују у случајевима где је доминатна карактеристика отпорност на хабање (примена за полуге, осовинице, чауре и зглобове).

Док се од Č.1221 израђују елементи намењени јаком хабању, али без нарочите жилавости језгра (осовинице, вретена, мерни инструменти), дотле се челик Č.4721, као легирани челик за цементацију, примењује тамо где је жилавост језгра значајна, као и где је при ударном оптерећењу потребно да цементирано слој задржи добру жилавост (брегаста и коленаста вратила, кардански зглобови, зупчаници).

Челик Č.3990 спада у челике за обраду на аутоматима за које није предвиђена термичка обрада. Хемијски састав, микроструктура и тврдоћа овог челика обезбеђује добру обрадивост на аутоматима и добро ломљење струготине.

Сви одабрани челици су веома заступљени у машиноградњи, а посебно често се припремају обрадом вучењем. Различитост хемијског састава изабраних челика изазива промене карактеристика, па се тако омогућава увид у значајно подручје механичких особина код конструкционих материјала.

На крају, овакав избор определили су и рационални параметри изводљивости предвиђених експеримената међу којима се издваја могућност припреме узорка за спровођење експеримената.

3.2 УЗОРЦИ ЗА ИСПИТИВАЊЕ

За испитивање су узете топловаљане шипке пречника $D_0 = 16, 18, 21, 26, 32, 42, 43 \text{ mm}$. Полазне топловаљане шипке су лужене ради уклањања оксидног слоја (коварине) по уобичајеном технолошком процесу у загрејаном разблаженом раствору сумпорне киселине. Овако припремљене шипке су вучене са редукцијом пречника $\Delta d = 1; 1,5; 2 \text{ mm}$ за $D_0 = 16 \text{ mm}$, односно редукцијом $\Delta d = 2 \text{ mm}$ за све остале пречнике. У случајевима повећаног захтева за толеранцијом мера, вршена је машинска обрада стругањем у циљу свођења на задати пречник.

Избор пречника је извршен тако што су узете вредности из интервала уобичајених пречника топловаљаних шипки које се, у поступку израде конструкционих елемената, подвргавају хладном вучењу.

Топловаљане шипке су даље коришћене за припрему узорака следећи захтеве методе за испитивање и постављене циљеве за примену одабране методе.

3.3 ПЛАН ИСПИТИВАЊА

Истраживања су подељена у целине за које се може применити иста припрема узорака и извођење експерименталног мерења. Оваква систематизација је приказана у табели 3.2, заједно са осталим детаљима који омогућавају увид у поступак експерименталног рада и обраде резултата експеримента у складу са циљем истраживања.

3.4 ОПИС МЕТОДА ИСПИТИВАЊА

3.4.1 Метода визиопластичности

Полазећи од поставки које важе за меридијалну раван код осне симетрије напона, развијена је метода експерименталног одређивања поља течења и брзина деформације. Ова експериментална метода је прихваћена и коришћена од стране великог броја истраживача. Метода се састоји у наношењу растерске мреже на меридијалну раван и праћењу чворних тачака на трајекторијама мреже после деформације узорка, уз задржавање зоне деформације. Развијена мерна процедура омогућава читавање положаја чворних тачака помоћу микроскопа, са истовременим регистровањем координата положаја чвора у мерној равни и уписивањем бројних вредности на рачунару. Са оваквим мерним могућностима корак мреже се може смањити и до $100 \mu\text{m}$.

Узорци за испитивање представљају полазне шипке за процес вучења. Шипке се обрађују глодањем на половину пречника које се касније спајају и тако добија узорак - шипка за испитивање са две меридијалне равни. Иначе, меридијалне равни се претходно фино брусе и полирају у циљу припреме за наношење растерске мреже. Мрежа се може наносити електрохемијски (до 1 mm растојања између чворова) или фотохемијски (до $100 \mu\text{m}$ корака мреже). У овим испитивањима су коришћена оба поступка наношења, зависно од прецизности која је потребна за реализацију конкретног циља испитивања.

Табела 3.2 План испитивања

Циљ испитивања и метода	Полазни узорци и материјал	Процеси и парамет.	Контролисане величине	Накнадни поступак	Циљно мерене величине	Резултат обраде и анализе
Течење метала у процесу вучења по методи визиопластичности	Топловаљане шипке $D_0=16\ 32$; 42 mm; дужине $L = 600\ mm$ - материјал: $\dot{C}.1221$, $\dot{C}.4121$, $\dot{C}.4721$; Топловаљане шипке $D_0=18\ ;\ 21$ mm; дужине $L = 600\ mm$ - материјал: $\dot{C}.3990$	Вучење: $\phi 16/\phi 15$, $\phi 16/\phi 14$, $\phi 32/\phi 30$, $\phi 32/\phi 40$, $\phi 21/\phi 20$, $\phi 21/\phi 19$, $\phi 18/\phi 17$, $\phi 18/\phi 16$	Угао матрице: $2\alpha = 0,314\ rad$, Брзина вучења: 0,12 m/s - $\phi 40\ mm$ 0,35 m/s - остало Мазиво: уље/паста Сила вучења: мерена величина	Раздвајање половина шипки и исецање сегмената са зоном деформације	Трајекторије чворних тачака дуж зоне деформације	Математички модел пластичног течења у радијалном и аксијалном правцу. Физички модел зоне пластичне деформације у процесу вучења са издвојеним факторима настанка заосталих напона.
Заостали напони у вученим шипкама по методи дифлекције	Топловаљане шипке $D_0=16$; 32; 42 mm; дужине $L = 600\ mm$ - материјал: $\dot{C}.1221$, $\dot{C}.4121$, $\dot{C}.4721$;	Вучење: $\phi 16/\phi 15$, $\phi 16/\phi 14,5$, $\phi 16/\phi 14$, $\phi 32/\phi 30$, $\phi 42/\phi 40$,	Угао матрице: $2\alpha = 0,314\ rad$, Брзина вучења: 0,12 m/s - $\phi 40\ mm$ 0,35 m/s - остало Мазиво: уље/паста Сила вучења: мерена величина	Уклањање једне заковице на извученој шипки	Угиб дуж отвора шипке (размак за одређени помак)	Математички модел за опис еластичне линије половине узорка - заостали напони у аксијалном правцу; Математички модел за дистрибуцију аксијалних заосталих напона по попречном пресеку вучене шипке
Заостали напони у топоваљаним и вученим шипкама по методи рентгенске дифракције - $\sin^2\psi$ техника	Топловаљане шипке пречника 18 mm, остругане на $D_0=16\ mm$, материјал: $\dot{C}.1221$; Топловаљане шипке $D_0 = 26$, 32, 43 mm, материјал: $\dot{C}.3990$	Вучење: $\phi 16/\phi 15$, $\phi 16/\phi 14,5$, $\phi 16/\phi 14$, $\phi 26/\phi 24$, $\phi 32/\phi 30$, $\phi 43/\phi 41$,	Угао матрице: $2\alpha = 0,314\ rad$, Брзина вучења: 0,12 m/s - $\phi 40\ mm$ 0,35 m/s - остало Мазиво: уље/паста Сила вучења: мерена величина	Резање ваљака од 30mm дужине и нагризање у раствору H_2SO_4	Угао дифракције за изабрану раван рефлексије на базној (равној) површини, у правцу осе и попречно на осу ваљка на цилиндричној површини	Коефицијент нагиба промене међуатомског растојања за задату раван рефлексије у зависности од угла ψ код вучених шипки; Вредности заосталих напона у аксијалном, радијалном и обимном правцу
Заостали напони у шипкама које су после вучења равнате са површинским сабијањем, по методи рентгенске дифракције - $\sin^2\psi$ техника	Топловаљане шипке пречника 18 mm, остругане на $D_0=16\ mm$, материјал: $\dot{C}.1221$;	Вучење: $\phi 16/\phi 15$, $\phi 16/\phi 14,5$, $\phi 16/\phi 14$,	Угао матрице: $2\alpha = 0,314\ rad$, Брзина вучења: 0,12 m/s - $\phi 40\ mm$ 0,35 m/s - остало Мазиво: уље/паста Сила вучења: мерена величина	Резање ваљака од 30mm дужине и нагризање у раствору H_2SO_4 ; Равнање са површинским сабијањем	Угао дифракције за изабрану раван рефлексије на базној (равној) површини, у правцу осе и потребно на осу ваљка на цилиндричној површини	Коефицијент нагиба промене међуатомског растојања за задату раван рефлексије у зависности од угла ψ код равнатих шипки; Вредности заосталих напона у аксијалном, радијалном и обимном правцу

Наставак табеле 3.2

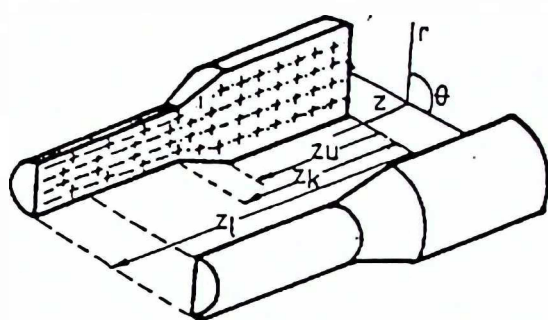
Циљ испитивања и метода	Полазни узорци и материјал	Процеси и парамет.	Контролисане величине	Накнадни поступак	Циљно мерене величине	Резултат обраде и анализе
Механичке особине у полазном топловаљаном стању, вученом стању и равнатом стању по стандардним методама за статичка и динамичка испитивања	Топловаљане шипке $D_0=16; 32; 42 \text{ mm}$; дужине $L = 600 \text{ mm}$ - материјал: $\check{C}.1221, \check{C}.4121, \check{C}.4721$; Топловаљане шипке пречника 18 mm , остругане на $D_0=16 \text{ mm}$, материјал: $\check{C}.1221$;	Израда епрувета од топоваљаних шипки; Вучење: $\phi 16/\phi 15$, $\phi 16/\phi 14,5$, $\phi 16/\phi 14$.	Угао матрице: $2\alpha = 0,314 \text{ rad}$; Брзина вучења: $0,12 \text{ m/s}$ - $\phi 40 \text{ mm}$ $0,35 \text{ m/s}$ - остало Мазиво: уље/паста Сила вучења: мерена величина	Равнање вучених шипки са површинским сабијањем; Резање на мерну дужину Израда епрувета	Дијаграми: Сила - издужење Сила - скраћење укупно издужење пречник на месту прекида, Број циклуса Амплитуда напона Средњи напон	Механичке особине у топоваљаном, струганом вученом и равнатом стању; Утицај заосталих напона на механичке особине при статичком и динамичком дејству силе
Редистрибуција заосталих напона код машински обрађених вучених шипки, по методи дифлекције	Вучене шипке за испитивање заосталих напона по методи дифлекције пречника: $\phi 15 \text{ mm}$ -- $\check{C}.1221$ $\phi 30 \text{ mm}$ - $\check{C}.4121$ $\phi 40 \text{ mm}$ - $\check{C}.4721$	Обрада на стругу у 9 пролаза: $\phi 15 \rightarrow \phi 11,7$ $\phi 30 \rightarrow \phi 15,5$ $\phi 40 \rightarrow \phi 20,6$	Дебљина скинутог слоја: $\approx 0,4 \rightarrow D = 15 \text{ mm}$ $\approx 1,8 \rightarrow D = 30 \text{ mm}$ $\approx 2,4 \rightarrow D = 40 \text{ mm}$	Растављање заковичног споја након сваког пролаза	Пречник после стругања; Угиб на издвојеним местима дуж узорка (размак за одређени помак)	Математички модел еластичне линије при редистрибуцији заосталих напона; Математички модел редистрибуције заосталих напона
Уклањање заосталих напона у вученим шипкама поступком жарења	Вучене шипке за испитивање заосталих напона по методи дифлекције пречника: $\phi 15 \text{ mm}$ - $\check{C}.1221$ $\phi 30 \text{ mm}$ - $\check{C}.1221, \check{C}.4121, \check{C}.4721$ $\phi 40 \text{ mm}$ - $\check{C}.4121$	Жарење 1 сат на температури од 390°C	Температура: - околине, - у пећи, Време жарења	Растављање заковичног споја на једном крају узорка	Угиб на издвојеним местима дуж узорка (размак за одређени помак)	Применљивост једначине Зенер-Аврама за опис уклањања заосталих напона
Симулација еквивалентног спољашњег оптерећења за савијање половине узорка, по методи коначних елемената	Симулациони услови: - пречник 14 mm - $\check{C}.1221$ - пречник 30 mm - $\check{C}.1221$ - пречник 40 mm - $\check{C}.4121$	Савијања спрегом сила који дејствује на чеону површину половине узорка	Спрег сила је по интензитету једнак моменту савијања при претпостављеној линеарној дистрибуцији ЗН, супротног знака	-	Тензор напона Ефективни напон Еластична линија Силе спајања отвореног узорка	Упоређење вредности напона добијених симулацијом са вредностима заосталих напона добијених методом дифлекције.

После наношења мреже на меридијалним равнинама половине шипке се спајају вијчаном везом и подвргавају вучењу. Када стационарни процес обухвати део шипке под растерском мрежом, вучење се тренутно прекида како би се избегао ефекат инерционог кретања. Шипке се, затим, повратним ходом ослобађају од вучне матрице. У наставку се уклањају вијчане везе и исецају зоне деформације из половине шипки (на довољном растојању од улаза, односно излаза из зоне). Такав узорак је приказан на слици 3.1(a).

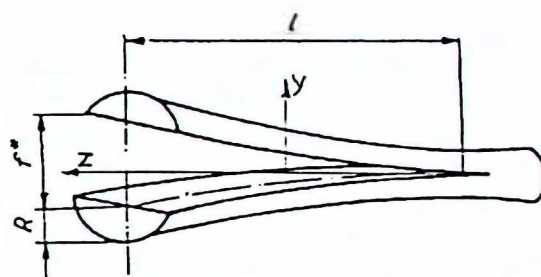
Мерење се састоји у читавању координата чворова које се затим преводе у вредности прираштаја у (r - z) равни, користећи полазни корак мреже и очитане вредности координата

$$\Delta r = r_i - r_{i-1}$$

$$\Delta z = z_i - z_{i-1}$$



(a)



(b)

Слика 3.1 - Узорак за испитивање по методи визиопластичности (a) и одређивање заосталих напона по методи дифлекције (b)

На основу брзине кретања алата одреде се временски интервали потребни за пролазак корака мреже (Δt) и прорачунају брзине померања чворова по релацијама:

$$v_r = \frac{\Delta r}{\Delta t}$$

$$v_z = \frac{\Delta z}{\Delta t}$$

као и брзине деформације у r - z равни

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial v_r}{\partial r}$$

$$\dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z}$$

Трећа компонента линијске брзине се добија из закона сталности запремине, тј.

$$\dot{\epsilon}_\theta = -(\dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_z)$$

а брзина деформације углова по релацији:

$$\dot{\gamma}_{rz} = \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r}$$

Тачност методе, тј. тачност одређивања поља брзина, зависи од корака растерске мреже, тачности геометријског наношења чворова и тачности читавања положаја чвора. Посебне тешкоће у примени методе стварају могућности смицања по меридијалној равни чиме се скида нанешена растерска мрежа. Такође, и друге специфичности процеса могу стварати тешкоће у задржавању растерске мреже, као на пример, "огрубљавање" (значајно повећање храпавости) површине које је изразито код високих степена деформације.

3.4.2 Метода дифлекције

Како је већ истакнуто, визиопластичност је до сада вишеструко потврђена као поуздан експериментални поступак за праћење течења метала у одређеним напонским стањима. Поуздана слика течења метала ствара простор за анализу свих појава које доминантно исходе из њега. Међу њима је и нехомогено течење материјала које, како је већ констатовано у поглављу 2.2, представља основни узрок појаве заосталих напона у процесима хладне деформације.

Такво једно разматрање дало је подлогу да се планира, разради и примени један посебан поступак заснован на методи дифлекције за истраживање заосталих напона у процесу вучења, као процесу хладне деформације са осносиметричним напонским стањем. Наиме, ако би се следио изворни концепт методе дифлекције код шипкастих материјала за одређивање аксијалних заосталих напона, било би потребно извршити подужно разрезавање шипке по меридијалној равни, на довољно великој удаљености, која по резултатима Пајтера износи $L = 10 R$. За разлику од претходног, овде је одабрана метода састављених половина шипки које се припремају и спајају као код методе визиопластичности, а деформишу без заустављања процеса на дужини која није мања од дужине коју предвиђа Пајтер. Уз поуздану слику течења метала, само ова метода може да у потпуности задржи тачну геометрију и димензије половина до меридијалних равни, што ће рећи и ефекте дифлекције под дејством аксијалног заосталог напона. Поред наведеног, њена несумњива погодност је и то, што се поступак спајања и раздвајања половина узорка изводи уобичајеним машинским поступцима који се примењују код заковичних веза.

Након припреме и вучења спојеног узорка, раставља се заковични спој на једном крају шипке. Под дејством аксијалних заосталих напона долази до отварања (дифлекције) половина, као што је приказано на слици 3.1(b). Мерењем растојања између половина шипки дуж отвора, добија се двострука вредност угиба.

Оцена тачности саме методе ће бити дата у делу резултата и њихове анализе, с тим што је тачност мерења угиба одређена уобичајеном тачношћу мерних прибора (помичног мерила, микрометра).

3.4.3 Метода рентгенске дифракције

Теоријске поставке, предуслови и тачност за примену ове методе су описани у теоријском делу рада. Као узорци за примену ове методе коришћени су ваљци дужине $L = 30 \text{ mm}$ који су исечени из експерименталних шипки. Обзиром на познате ефекте (деформације и машинске обраде) на самој површини узорка, они су свестрано нагризани у разблаженој сумпорној киселини до искуствено препознатљиве боје и стања површине. Наравно, овај поступак не изазива мерљиву промену димензија.

3.4.4 Методе испитивања механичких особина

Планом испитивања су предвиђене следеће методе испитивања:

- а) испитивања затезањем,
- б) испитивања притискивањем,

као стандардне методе за испитивање материјала са статичким дејством сила, и

- в) савијање у три тачке,
- г) затезање/притисак,

као стандардне методе за испитивање материјала подвргнуте динамичком дејству сила.

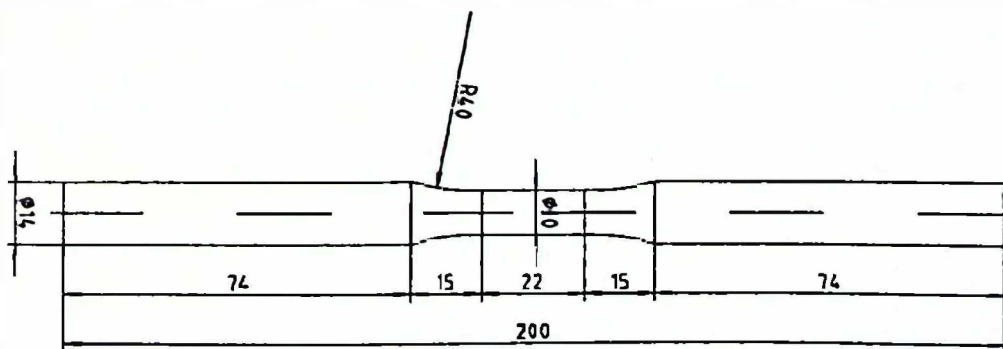
Сва ова испитивања су вршена у складу са одговарајућим и општепознатим стандардним поступцима.

Узорци за испитивање су били следећи:

- а) код испитивања затезањем - пропорционалне и пропорционално-кратке епрувете;
- б) код испитивања притискивањем - епрувете са равним челом и односом $L/D = 1,5$;
- в) код савијања у три тачке - епрувете су делови шипки са дужином прилагођеном пречнику шипке;
- г) код испитивања на замор (затезање/притисак) - епрувете облика приказаног на слици 3.2.

3.4.5 Метода истраживања редистрибуције аксијалних заосталих напона

Узорци који су коришћени за испитивање заосталих напона по методу дифлекције су примењени и за истраживање редистрибуције заосталих напона која прати машинску обраду стругањем. Стругање површинског слоја вучених узорка се врши са изабраним бројем пролаза и изабраним респективним дебљинама скинутог слоја. Предуслов за примену ове методе је да се напонско стање не нарушава наизменичним растављањем и спајањем половина узорка између два пролаза на стругу, већ да се промена напона врши сагласно полазном моделу дистрибуције напона по попречном пресеку и дебљини скинутог слоја као физички одстрањеном делу материјала (који са собом односи и припадајући удео еластичне енергије).



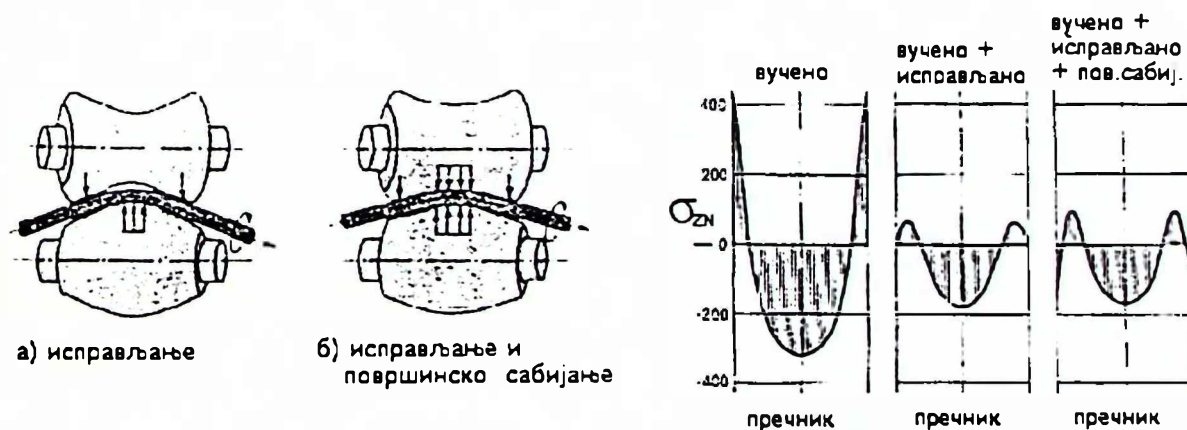
Слика 3.2 - Епрувета за испитивање на замор (затезање/притисак)

Поступак се, дакле, састоји у мерењу растојања између половина шипки дуж отвора након сваког пролаза машинске обраде и уклањања заковичног споја на крају сваког узорка. Као резултат добија се промена еластичне линије у зависности од пречника узорка после машинске обраде, што омогућује корелацију ових величина са заосталим напонима. Уз наведене претпоставке, ниједан од полазних услова није доведен у питање, па је по том основу задржана и полазна тачност методе.

3.4.6 Методе истраживања уклањања (релаксације) заосталих напона

Код термичког поступка релаксације напона неопходно је једносатно жарење на издвојеној температури при којој вредност напона опадне за једну половину. Узорци за ова испитивања код аксијалних напона су, као и код њиховог одређивања, биле састављене половине шипки. Након спроведеног режима жарења заковични спој је уклањан и мерено је растојање, као код претходних поступака. Половина вредности напона у овом случају треба да одговара половини полазног растојања (размака) на комплетној дужини отвора (помаку), што је сагласно претпоставкама Пајтера за прорачун аксијалних заосталих напона.

Релаксација напона код процеса вучења може да се врши и механичким поступком који је примењена равналици са хиперболичним ваљцима. При томе, се остварује истовремено савијање и ротација шипке између ваљака. Степен деформације при савијању је мали и достиже свега неколико процената. Осим пластичне деформације савијањем може се остварити извесно сабијање површине шипке. У том случају процес је ближи редистрибуцији него уклањању заосталих напона. Полазно стање аксијалних напона и ефекат равнања са хиперболичним ваљцима на аксијалне напоне дати су на слици 3.3 [19].



Слика 3.3 - Релаксација аксијалних напона на равналици са хиперболичним ваљцима

3.5 КОРИШЋЕНА ОПРЕМА ЗА ИСПИТИВАЊЕ

Полазне Шипке су узете после топлог ваљања на комбинованој ваљаоници Жељезаре "Никшић". Шипке су затим подвргнуте хемијском чишћењу површине (лужењу) у Лужионици челика Жељезаре "Никшић".

Сва експериментална вучења су обављена на индустријској вучној клупи Вучионице челика Жељезаре "Никшић". Изузетак представљају поједини

експерименти код методе визиопластичности који су извршени на специјално конструисаном вучном уређају (који омогућава да се испуни услов тренутног заустављања процеса) у Лабораторији Металуршко-технолошког факултета у Подгорици.

Равнање експерименталног дела шипки је вршено на индустријској равналици у Вучионици челика Жељезаре "Никшић".

Испитивање механичких особина при статичком дејству силе рађено је на универзалним машинама за испитивање материјала са електронском регулацијом и регистрацијом сигнала типа INSTRON у Институту Комбината алуминијума у Подгорици, HECKERT у Лабораторији Металуршко-технолошког факултета у Подгорици и типа SCHENCK у Војно-техничком институту у Београду.

Испитивања механичких особина при динамичком дејству силе су вршена на машини SCHENCK у Војнотехничком институту у Београду.

Жарење је вршено у лабораторијској пећи за жарење са регулацијом температуре од $\pm 2^{\circ}\text{C}$ до 600°C у Лабораторији МТФ - Подгорица.

Сва испитивања рентгенском дифракцијом су урађена на апарату ДРОН-2 у Институту за материјале и технологију у Москви.

Сва остала потребна мерења и припреме су обављене у лабораторијама Техничких факултета у Подгорици, те Института Гоша у Београду и Смедеревској Паланци.

3.6 РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗА

3.6.1 Испитивање процеса вучења

Вучење је изабрано као технолошки процес који изазива настанак заосталих напона, па уједно представља основни поступак припреме за остали део експерименталног рада. Тако је испитивање обухватило:

- експерименте за одређивање услова настанка заосталих напона, према подацима у табели 3.3;
- експерименте за одређивање величине заосталих напона и корелације са механичким особинама, према подацима датим у табели 3.4.

Табела 3.3 Експериментална вучења за анализу течења и узрока настанка ЗН

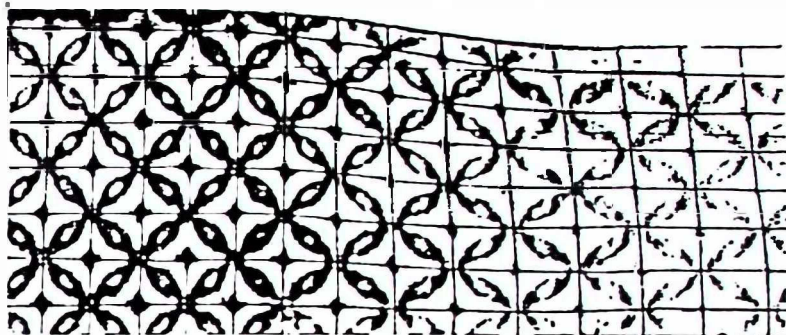
ОЗНАКА УЗОРКА	Материјал	Полазни пречник [mm]	УСЛОВИ ВУЧЕЊА			
			Редуковани пречник [mm]	Брзина вучења [m/s]	Мазиво	Угао матрице [rad]
1.1	Č.3990	21,2	20,2	0,35	уље	0,314
1.2	Č.3990	17,9,2	16,1	0,35	уље	0,314
3	Č.1221	16	14,5	0,35	паста	0,314
7	Č.4121	32	30	0,35	уље	0,314
* Шипке полазног пречника су добијене обрадом на стругу топловаљаних шипки.						

Табела 3.4 Експериментална вучења - означавање узорака за испитивање заосталих напона и механичких особина

ОЗНАКА УЗОРКА ЗА ИСПИТИВАЊЕ ЗН					Материјал	Полазни пречник узорка [mm]	УСЛОВИ ВУЧЕЊА				Ознака узорака за испитивање механичких особина		
Вучено стање		Равнато стање	Машински обрађено стање				Излазни пречник [mm]	Брзина вучења [m/s]	Мазиво	Угао матрице 2α [rad]			
Дифлекција	Рентг. дифр.	Рентгенска дифракц.	Дифлекција	Рентгенска дифракција							Вучено стање	Равн. стање	
1	1В	1Р	1	-	Č.1221	16	15	0,35	уље	0,314	I	IV	
2			-	-			14,5				II	V	
3			2В	2Р			-				-	III	VI
4			3В	3Р			-				3.1 - 3.3		
5	-	-	-	-	Č.4121	32	30	0,35	уље	0,314	5	5	
6	-	-	-	-	Č.4721				паста		6	6	
7	-	-	-	-	Č.4121				уље		7	7	
8	-	-	-	-	Č.1221						8	8	
9	-	-	9	-	Č.4721						9	9	
10	-	-	10	-	Č.4121	42	40	0,12	уље	0,314	10	10	
11	-	-	-	-	Č.4121				паста		11	11	
-	2.1	-	-	-	Č.3990	16	14	0,35	уље	0,314	-	-	
-	2.2	-	-	-		26	24				-	-	
-	2.3	-	-	-		32	30				-	-	
-	2.4	-	-	-		43	41				0,12	-	-

3.6.1.1 Течење метала и настанак заосталих напона

Мерења за програм вучења приказан у табели 3.3 се врше у зони деформације узорка чија је фотографија приказана на слици 3.4. Она обухватају одређивање координата чворних тачака мреже дуж трајекторије, а врше се на мерном микроскопу који је повезан са уређајем за дигитално регистровање сигнала и персоналним компјутером на коме се записују дигитални сигнали у складу са координатним системом датим на слици 3.1. Експериментални подаци за координате чворних тачака мреже у процесу деформације су прерачунати на померања, као разлике између деформисаног и полазног растојања узастопних чворова у правцу одговарајуће координатне осе - слика 3.1.



Слика 3.4 - Зона деформације са мрежом у меридијалној равни (увеличано)

Претходна анализа за померања је показала да се њихова промена у $(r - z)$ меридијалној равни може описати математичким релацијама [25,26]:

$$\Delta r = (b_1 r + b_2) \cdot \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[\frac{z - b_3 r - b_4}{b_5 r + b_6} \right] \right\}$$

за радијално померање, и

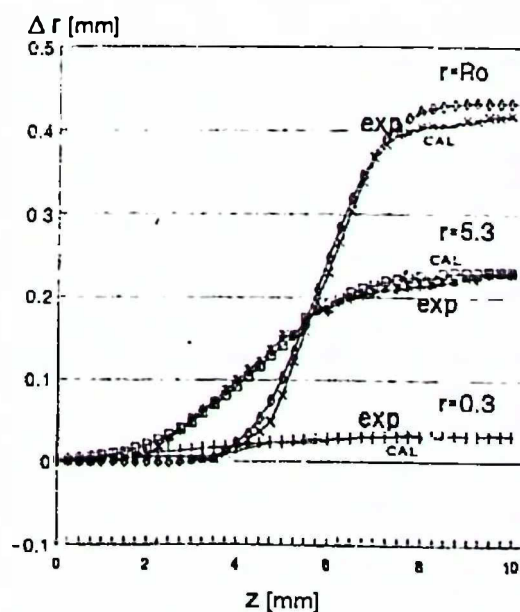
$$\Delta z = c_1 \cdot \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[\frac{z - c_2 r - c_3}{c_4 r + c_5} \right] \right\},$$

за аксијално померање.

У једначинама је

$$\operatorname{erf}(z) = 2 \pi^{-1/2} \int_0^z \exp(-t^2) dt, \text{ а}$$

коэффициенти b_i и c_i одређени су из услова минимума квадрата разлике измерених и прорачунатих померања. Резултати апроксимације оваквим једначинама код узорка 1.1 за три карактеристичне трајекторије (на оси, на средњем полупречнику и на површини шипке) су приказани на слици 3.5. Очигледна задовољавајућа корелација је омогућила да се наставак анализе врши на основу моделних једначина.



Слика 3.5 - Померање дуж три карактеристичне трајекторије за узорак 1.1 (exp - подаци из експеримента; cal - прорачунато по моделу)

3.6.1.2 Зона деформације и модели течења

За тачно одређивање облика зоне коришћене су функције померања. Тако су за границе зоне усвојени z -положаји на којима вредности померања задовољавају услове:

За почетак зоне:

$$|\Delta r(r, z = z_0) - 0,0005| = 0$$

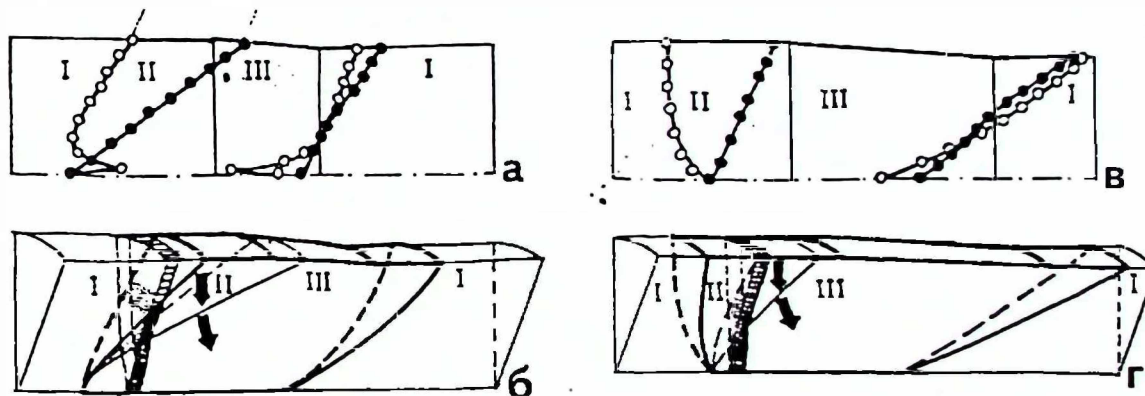
$$|\Delta z(r, z = z_0) - 0,0005| = 0$$

За завршетак зоне:

$$|\Delta r(r, z = z_1) - 0,0005| = 0$$

$$|\Delta z(r, z = z_1) - 0,0005| = 0$$

Број 0,0005 који фигурише у једначинама представља минималну вредност промене коју је могуће експериментално регистровати, што у односу на корак мреже (0,25 mm) износи 0,2 %. Поступком поделе интервала су добијена решења за z -положај за које је вредност леве стране једначина мања од 10^{-8} . Резултати за два узорка су дати на слици 3.6.



Слика 3.6 - Зоне деформације (а и в) и изведени модели течења (б и г) код вучења узорака 1.1 и 1.4, респективно

Код облика зоне датог на слици 3.6-а деформација почиње на оси узорка истовремено вертикалним Δr и хоризонталним Δz - померањем (област III), па се затим око ове области формира нова област са чистим вертикалним померањем (област II). Деформација даље континуално напредује ширењем области II и III према површини. Област II обухвати комплетан вертикални пресек знатно пре контакта метала са матрицом, а област III тек у зони контакта. Овај модел је прилагођен осној симетрији зоне деформације и закону сталности запремине, и представљен је на слици 3.6-б.

Течење које одговара шеми на слици 3.6-в почиње вертикалним померањем на површини шипке (област II). Област почетног течења се шири даље до осе, на којој деформација почиње истовремено Δz и Δr -померањима (област III). Течење са карактеристикама области III се проширује на целокупни пресек пре контакта шипке и алата, што је представљено моделом на слици 3.6-г.

Прелазак са једног на други модел се поклапа са истовременим почетком Δr - померања по целокупном пресеку померања. Са повећањем редукција почетак течења на површини шипке се приближава (и на крају поклапа) са почетним контактом шипке и матрице. Истовремено се и почетак на оси помера у контактну област стварајући једну границу у облику лука, видљиву после нагризања [21,22].

Почетак деформације је знатно компликованији у случају непотпуне осносиметричности, када се због разлика изнад и испод уздужне осе јављају одступања у односу на издвојене моделе. Ефекат померања осе из полазног положаја се види код почетка $\Delta\epsilon$ - померања. Прекид код раздвојених узорака допунски подстиче ову појаву и она је уочена код готово свих испитиваних узорака.

Завршеци пластичног течења за радијално и осно померање се практично поклапају. Померање на оси престаје још у конусном делу матрице, а на осталим деловима се наставља и завршава тек у калибрујућем делу алата. Овакав постепени завршетак деформације означава да елементарни диск излази еластично-пластично деформисан, са пластичном облашћу III на површини и еластичном облашћу I на оси.

3.6.1.3 Настанак заосталих напона

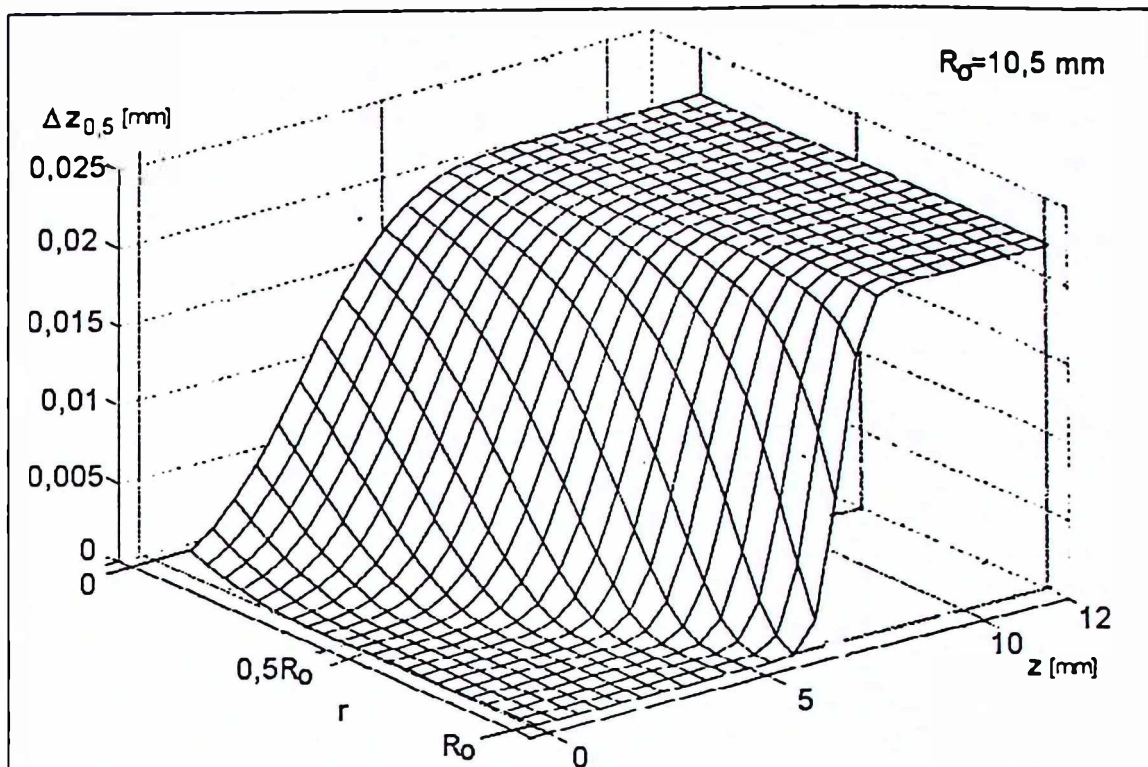
Еластично-пластична деформација на улазу и излазу из зоне деформације неизбежно изазива појаву заосталих напона. На улазу у зону деформације они утичу на полазни ток основних компоненти напона. Међутим, одмах након почетног пластичног течења слика почетно формираних заосталих напона се мења, тако да је њихов даљи утицај (а самим тим и значај) занемарљив.

Еластично пластични завршетак зоне деформације поново актуелизује настанак заосталих напона. Овај ефекат је веома изражен, а како настали напони остају у извученом комаду, ефекат постаје од прворазредне важности. Настали напони задржавају тип основног напонског стања, што значи да су присутне три нормалне компоненте напона и то: аксијална, радијална и обимна. То уједно значи да се за њихово извођење мора успоставити корелација између добијених ефеката течења и напона чиме се задатак проширује на остале пласто-механичке карактеристике зоне деформације. Овакав задатак се може решавати симулацијом примењујући метод коначних елемената. Резултати такве симулације дати у раду [17] су показали континуални наставак основних напона са константним вредностима изван зоне деформације у правцу кретања шипке. Такве вредности представљају вредности заосталих напона. Значи, извучени комад задржава исте компоненте основног напонског стања, али са вредностима које произлазе из енергетског биланса, односно запреминске уравнотежености. Мора се имати у виду да је значајно ограничење оваквих симулација веома мала тачност резултата. Због тога ће се у наставку приказати резултати за течење метала који могу квантитативно приказати разлоге настанка заосталих напона. Тако су на основу једначина за течење добијени просторни дијаграми аксијалног и радијалног померања чији типични облик за узорак 1.1 илуструју слике 3.7 и 3.8. Вредности померања представљају издужење/скраћење полазног растојања између чворова (од 0,5 mm) у правцу оса (r - z)-равни. Брзине померања у потпуности одговарају току промене померања будући да је временски корак идентичан за сваки чвор. То потврђују дијаграми v_z/v_0 и v_r/v_0 (v_0 – брзина кретања алата при вучењу) приказани на сликама 3.9 и 3.10.

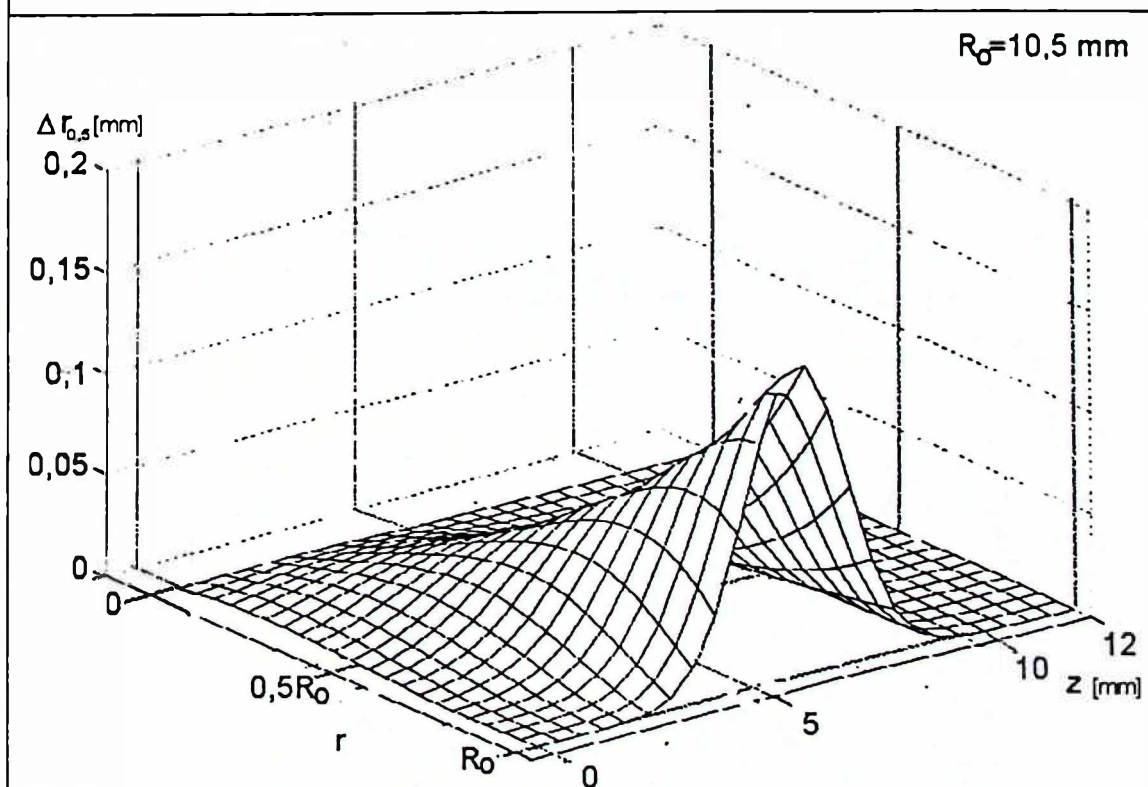
Детаљнија анализа дијаграма је дата у радовима [24,25,26]. Међутим, са становишта заосталих напона они су непрегледни и морају се превести на ближе узроке које изазивају еластично-пластични завршетак зоне деформације. Јасно је из модела течења да су то:

- неравномерни почетак померања код аксијалног течења;
- различита коначна померања код радијалног течења.

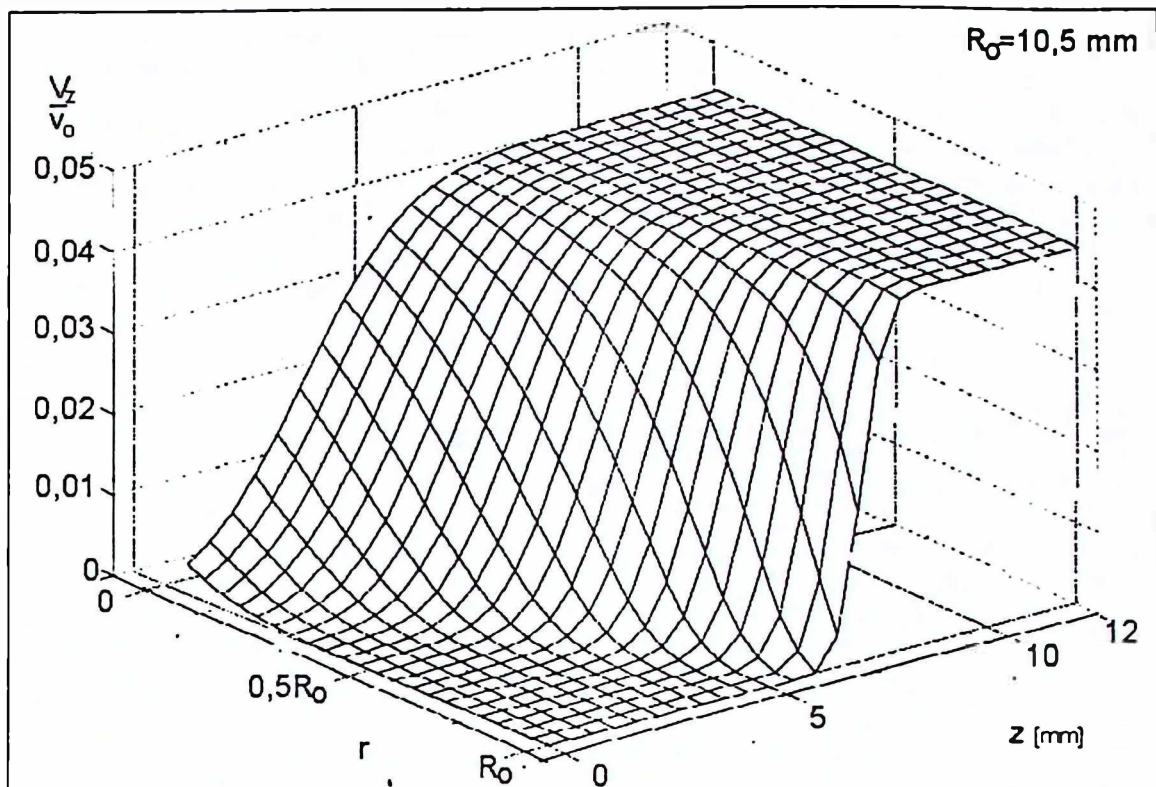
У првом случају течење почиње неравномерно, па се и коначне (константне) вредности прираштаја постижу неравномерно. Са аспекта брзина то значи да се коначне брзине померања достигну у различитом z -положају.



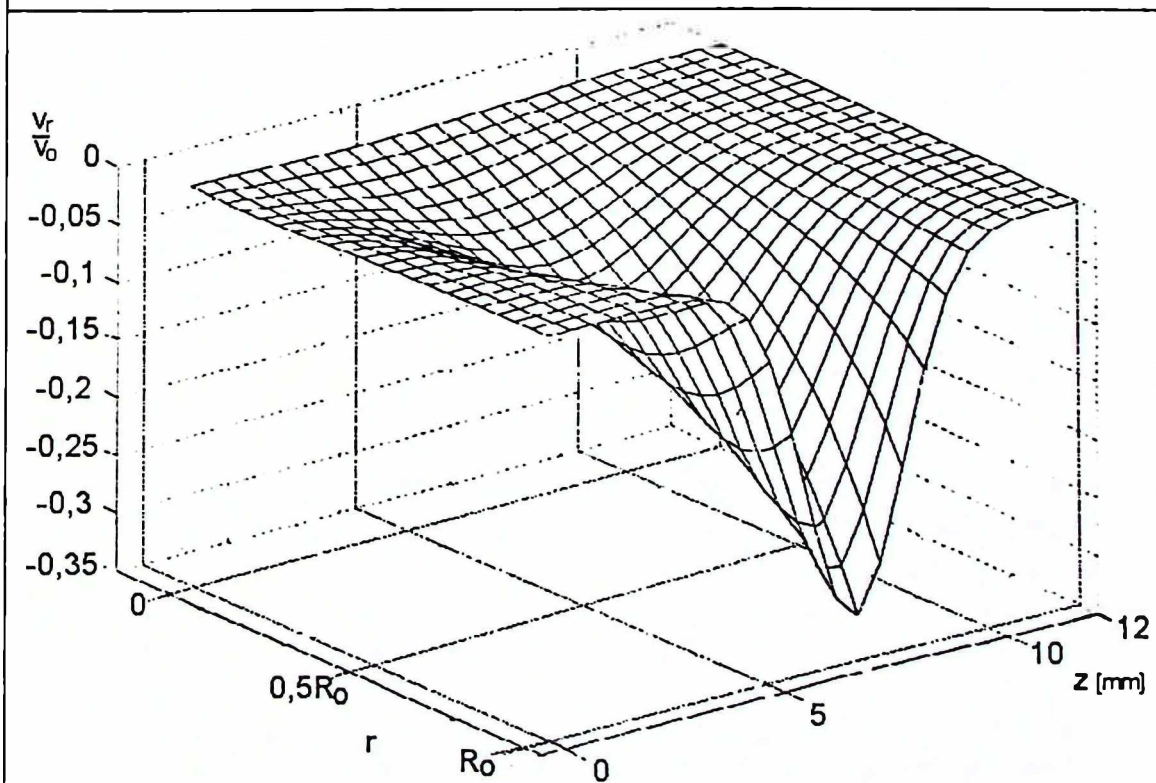
Слика 3.7 - Промена корака мреже у аксијалном правцу при проласку кроз зону деформације за узорак 1.1



Слика 3.8 - Промена корака мреже у радијалном правцу при проласку кроз зону деформације за узорак 1.1



Слика 3.9 - Дијаграми релативних брзина у аксијалном правцу у зони деформације за узорак 1.1



Слика 3.10 - Дијаграми релативних брзина у радијалном правцу у зони деформације за узорак 1.1

У другом случају је дужина редукције пречника од површине према оси различита, па је тако и брзина у сваком z-положају различита.

Оба ефекта остају у металу, а као њихов квантитативни показатељ могу послужити кумулативне вредности за издвојене r-положаје у меридијалној равни. Такве вредности за Δz су приказане на дијаграму, слика 3.11. На z-растојању које квазидинамички значи завршетак зоне деформације $\Sigma \Delta z$ се линеарно смањује од осе до површине. Ако се као компаративна тачка узме $\Sigma \Delta z$ за $2/3 R_0$ и одреде релативни односи показатеља нехомогености:

$$\Sigma \Delta z_r = 1 - \Sigma \Delta z_{(r)} / \Sigma \Delta z_{(2/3 R_0)}$$

добие се такође линеарна промена са позитивним вредностима у области $r = (2/3 R_0 \div R_0)$ и негативним вредностима за $r = (0 \div 2/3 R_0)$. Однос апсолутних вредности на површини и оси је 1/2. Исте законитости су добијене на узорцима 1.2, 3 и 7, слика 3.12. За по два пара узорка су веома блиске бројне вредности (1.1 и 7, као и 1.2 и 3). Уочљиво је да већи степен редукције попречног пресека изазива мање вредности релативног показатеља на површини пресека и у оси (1.2 у односу на 1.1), што је у складу са течењем материјала по првом и другом моделу.

Сличним разматрањима за Δr и поређењем са $\Sigma \Delta r$ на површини добија се релативни показатељ нехомогености у радијалном правцу:

$$\Sigma \Delta r = (1 - \Sigma \Delta r_{(r)} / \Sigma \Delta r_{(R_0)})$$

Дијаграм промене $\Sigma \Delta r$ приказан је на слици 3.13. Овај релативни однос је у свим случајевима између 0 на површини и 1 на оси. Дијаграм промене није линеаран већ постоји интензивна промена у околини осе стварајући тако веома изражен максимум.

Трећа компонента линијске деформације је одређена променом радијалне компоненте (v_r / r), па се и прираштаји могу одредити на такав начин:

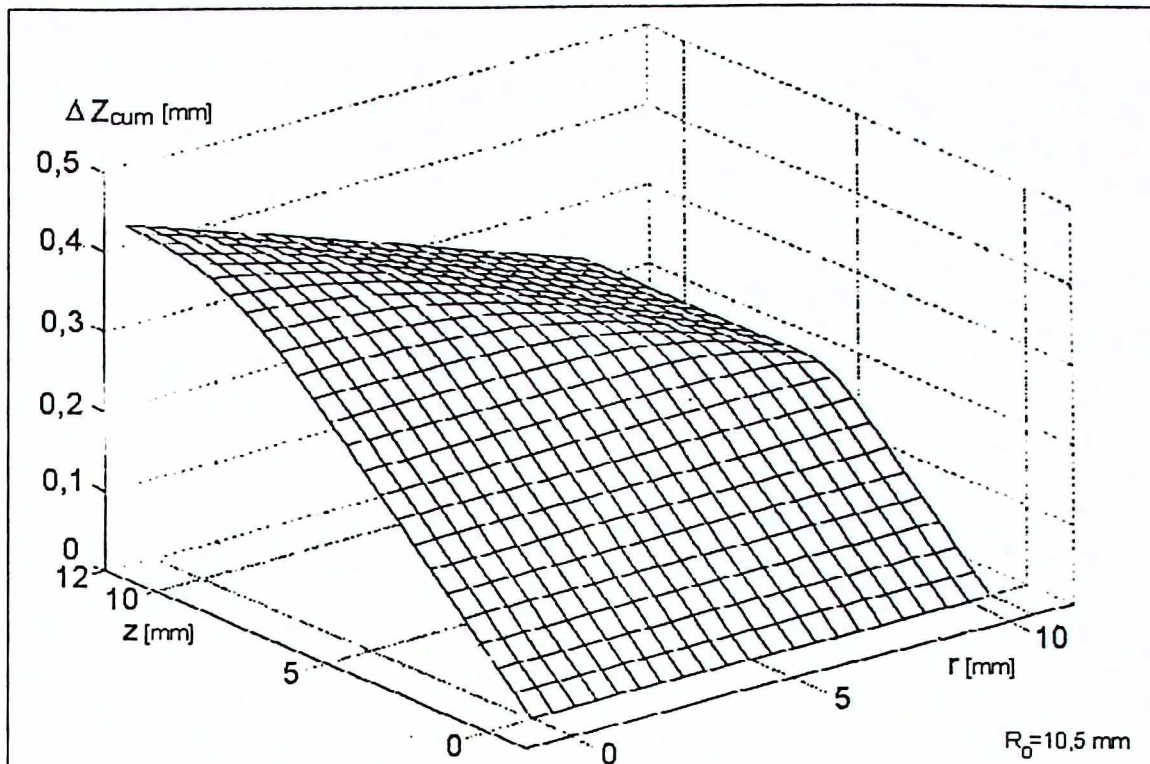
$$\epsilon_{\theta} = \frac{\partial(\Delta \theta)}{\partial \tau} = \frac{\frac{\partial(\Delta r)}{\partial \tau}}{r}$$

односно

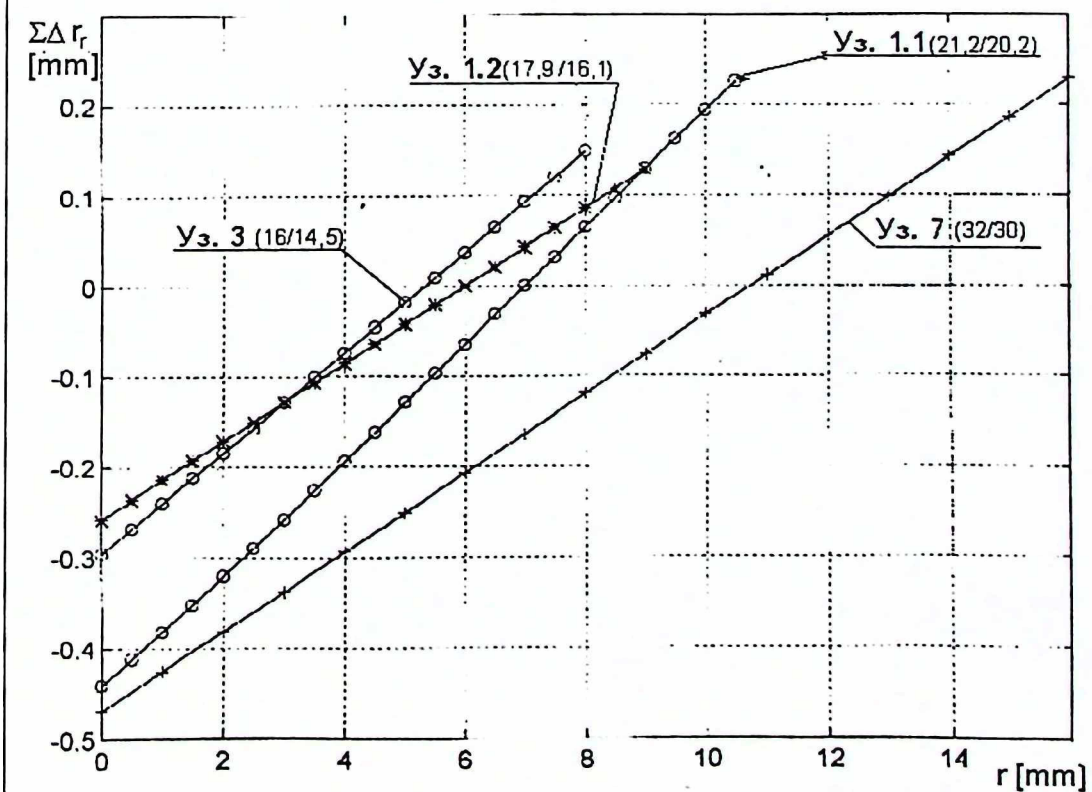
$$\Delta \theta \approx \frac{\Delta r}{r}$$

Дијаграм промене $\Delta r/r$ је приказан на слици 3.14, а дијаграми зависности $\Sigma(\Delta r/r) = f(r)$ на сликама 3.15 и 3.16. Резултати на слици 3.16 показују да су прорачунате вредности $\Sigma(\Delta r/r)$ у области осе два пута веће од вредности на површини. (Како је за $r=0$ $\Delta r/r$ - неодређено, то је прва вредност узета на положају $r=0.5 \text{ mm}$.) Таква промена је блиска промени $\Sigma \Delta z$, али се и од ње разликује пошто није линеарна.

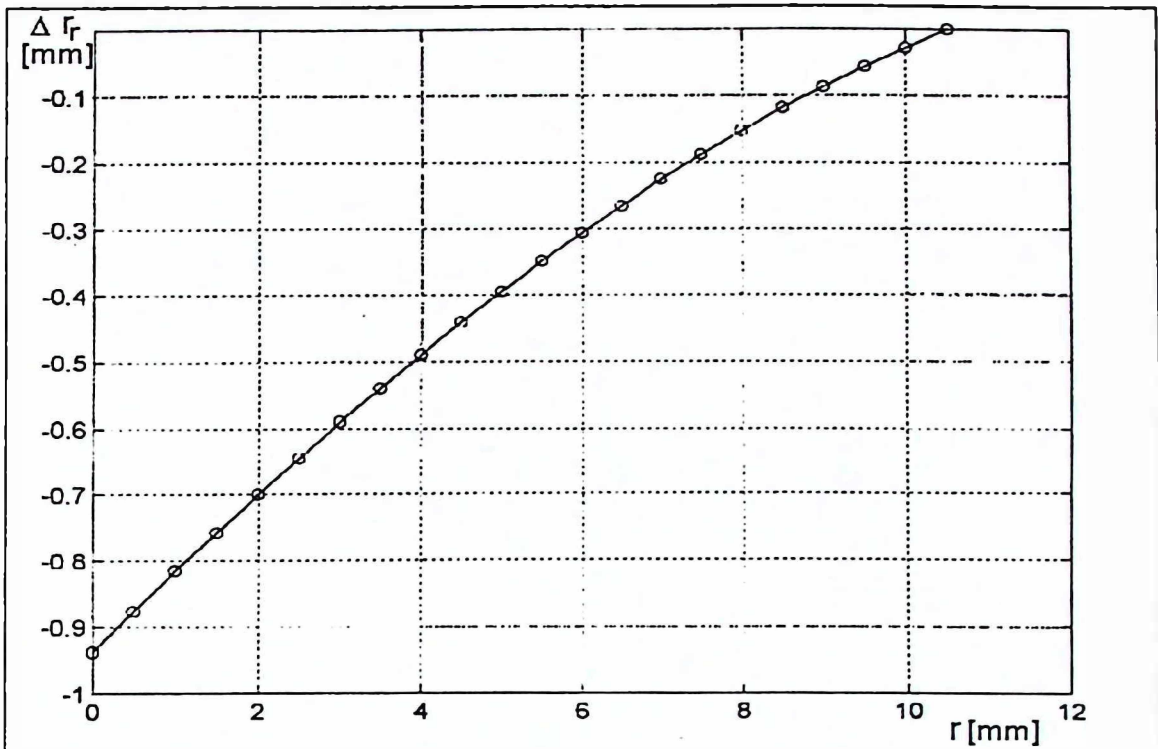
Наведене карактеристике се морају одразити и на последице које произлазе из ових разлика, односно у конкретном случају на заостале напоне. Изабрани упоредни положаји за аксијална ($2/3 R_0$) и радијална (R_0) померања представљају пресек, односно површину на којима су компоненте тих напона једнаке нули. Значи, ако се шеме дистрибуције ових напона прихвате као на слици 2.2, онда је вероватније да облик промене линија одговара наведеним облицима промене релативних показатеља нехомогености.



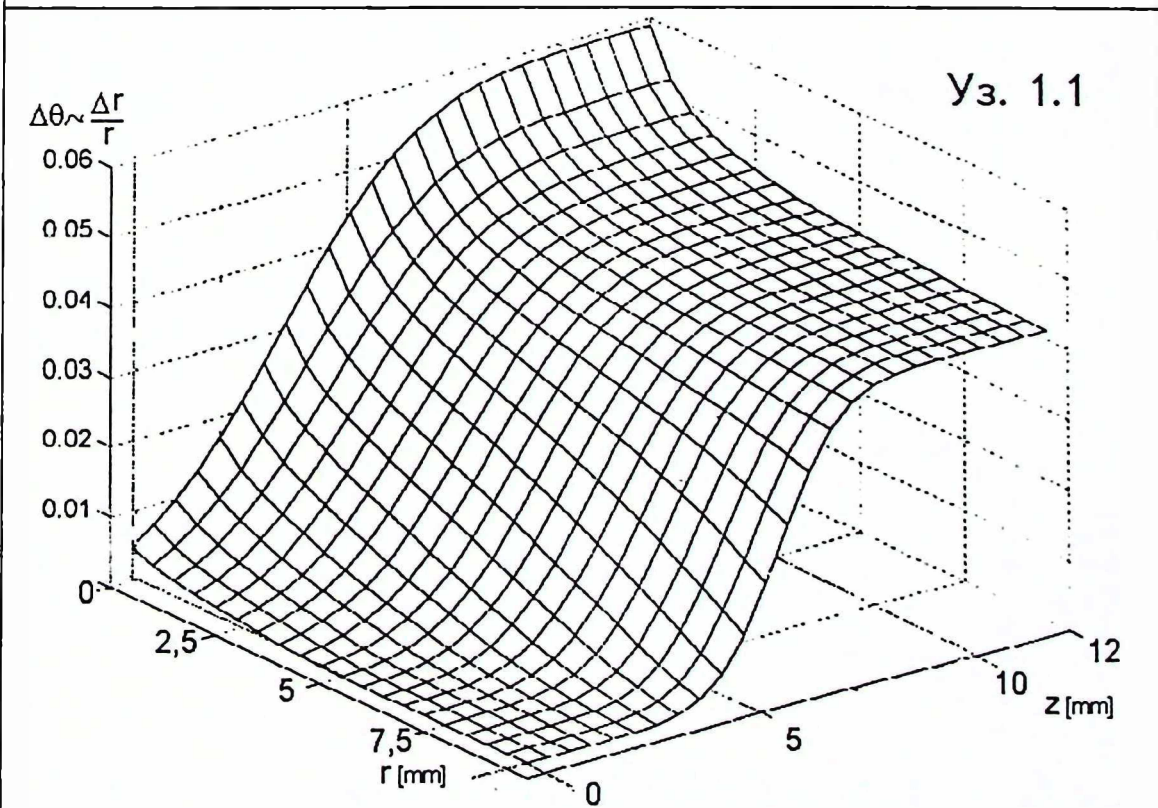
Слика 3.11 - Кумулативне вредности ΔZ за издвојене r - положаје у меридијалној равни за узорак 1.1



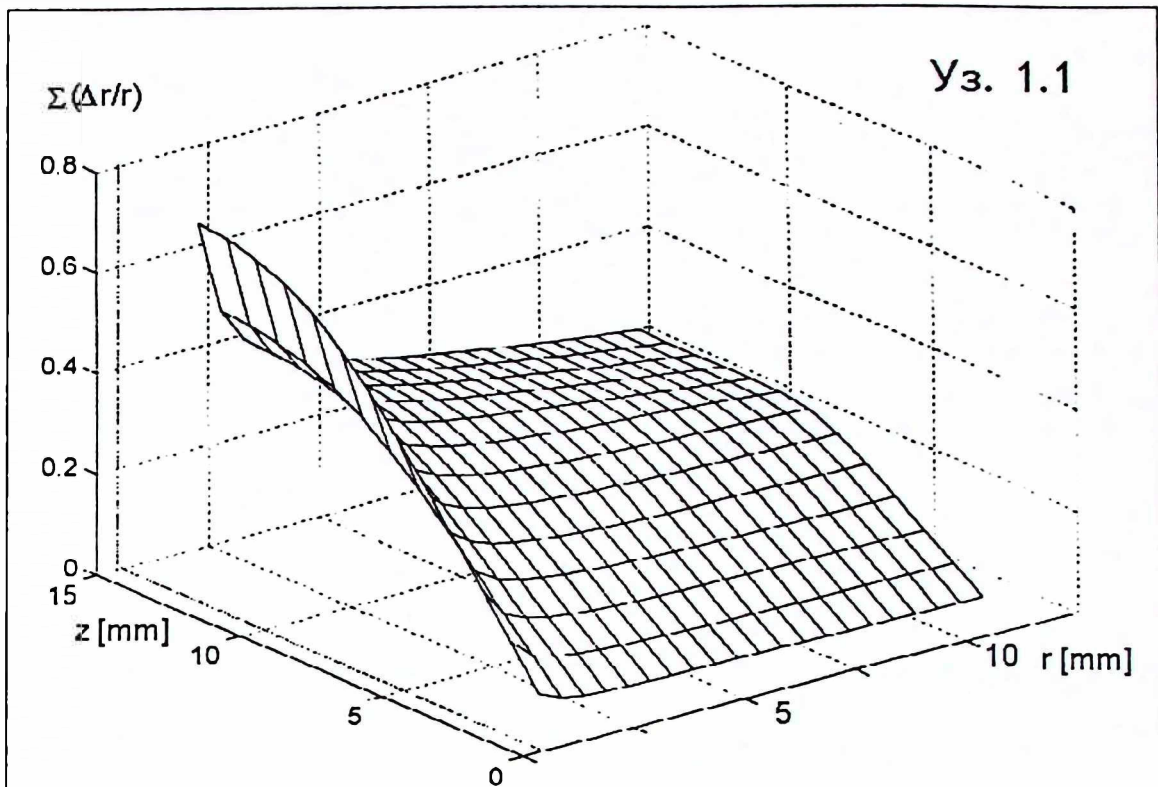
Слика 3.12 - Дијаграми релативног показатеља нехомогености $\Sigma \Delta z_r$ на попречном пресеку вучених узорака



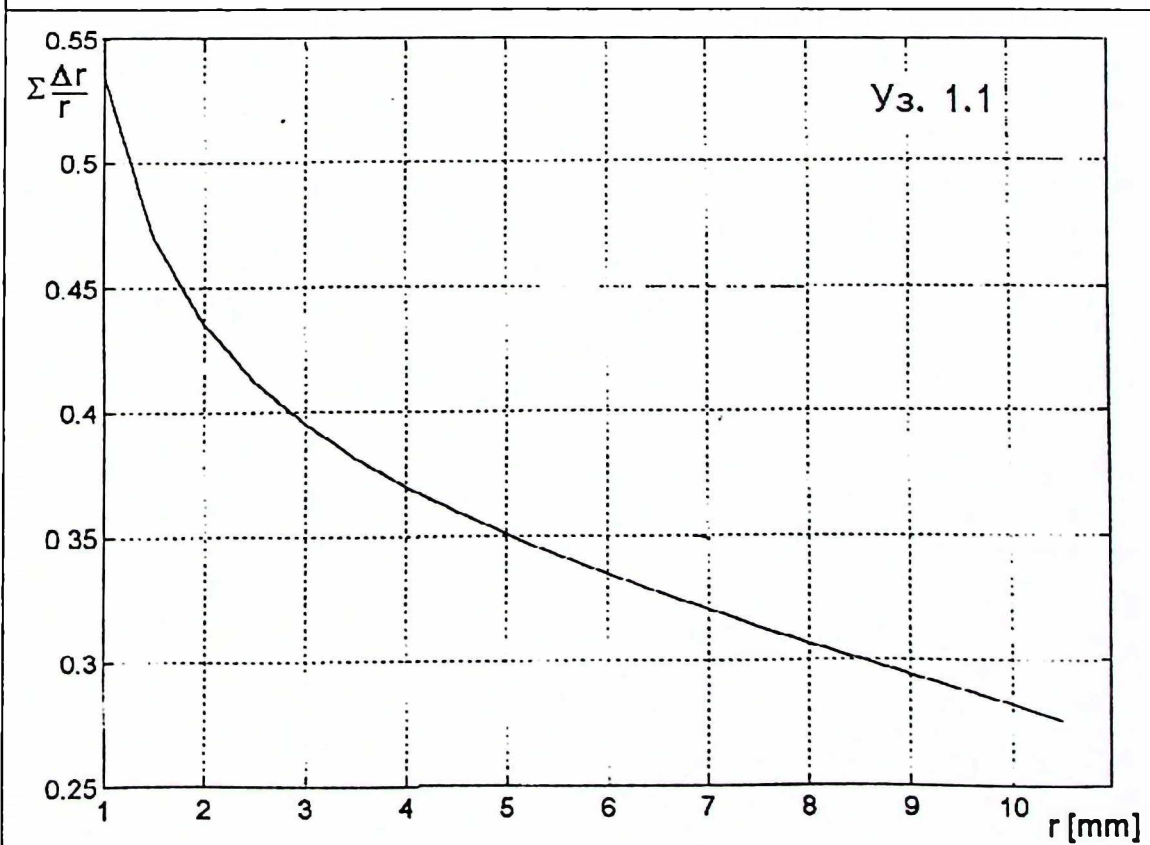
Слика 3.13 - Промена релативног показатеља нехомогености $\Sigma \Delta r_r$ на попречном пресеку за узорак 1.1



Слика 3.14 - Дијаграм промене $\Delta r_r / r$ при проласку кроз зону деформације



Слика 3.15 - Вредности $\Sigma(\Delta r/r)$ у зони деформације



Слика 3.16 - Коначне вредности $\Sigma(\Delta r/r)$ у зависности од полупречника

3.6.2 Испитивање заосталих напона рентгенском дифракцијом

3.6.2.1 Избор параметара експеримента

За испитиване узорке одабрана је рефлексија 220 јер је за неоптерећену кристалну решетку челика одговарајући Брагов угао $\theta = 62^\circ$, што значи довољно велики за добијање јасних максимума на рентгенограму и за могућност варирања угла ψ .

Одабран је рад у Ω -геометрији као чешће коришћеној техници за мерење заосталих напона и погоднијој за примену на цилиндричним површинама узорака.

Када је у питању угао ψ , вршена су мерења за следеће вредности: $\psi = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ и 45° . Број тачака од 3 до 5 је емпиријски утврђен као довољан за дефинисање линеарне зависности $\partial\theta/\partial\sin^2\psi$.

3.6.2.2 Резултати мерења и тачност прорачуна

Експериментални резултати су сређени у табели 3.5 у којој су коришћене следеће ознаке:

- P - компонента заосталих напона у радијалном правцу;
- O - компонента заосталих напона по обиму (у обимном правцу);
- A - компонента заосталих напона у аксијалном правцу;
- Φ - пречник узорка (ознака P иза броја означава равнато стање, T - топловаљано стање; B - вучено стање; M - стање након машинске обраде на стругу вученог узорка [mm]);
- θ - Брагов угао $[\circ]$;
- d - међуатомско растојање [10^{-8} m];
- ψ - угао нагињања узорка у Ω -геометрији $[\circ]$;
- $\text{tg } \alpha$ - нагиб праве добијен линеаризацијом експерименталних тачака где је ордината d, а апсциса $\sin^2\psi$ (коришћењем програма MathCad);

$$\sigma_\psi = \frac{\text{tg } \alpha}{d} \cdot \frac{E_{220}}{1+\nu}, \text{ где је}$$

$E_{220}/(1+\nu)$ - еластична константа за рефлексију 220 [MPa]

Табела 3.5 Резултати рефлексија и заосталих напона по методи рентгенске дифракције

УЗОРАК	ПРАВАЦ	$\Psi [^\circ]$	0	15	30	40	45	$\text{tg}\alpha$ [10^{-8} m]	σ_φ [MPa]
		$\sin^2\Psi$	0	0,067	0,250	0,413	0,50		
		ϕ, ϕ_1	$\theta [^\circ] \quad ; \quad d [10^{-8} \text{ m}]$						
1	P	16-T	61,88	61,91	61,94	-	-	-0,00381	-630
			1,0142	1,0139	1,0136				
1	O	16-T	61,96	61,98	61,98	-	-	-0,0009	-150
			1,0141	1,0140	1,0139				

Наставак табеле 3.5.

УЗОРАК	ПРАВАЦ	$\Psi [^\circ]$	0	15	30	40	45	$\text{tg}\alpha$ [10 ⁻⁸ m]	σ_p [MPa]
		$\sin^2\Psi$	0	0,067	0,250	0,413	0,50		
		ϕ, ϕ_1	$\theta [^\circ] \quad ; \quad d [10^{-8} \text{ m}]$						
1	A	16-T	62,00 1,0138	62,00 1,0138	62,01 1,0137	-	-	-0,00028	веће од - 150
1B	P	15-B	61,90 1,0147	61,87 1,0150	61,92 1,0145	-	-	-0,00068	веће од - 150
1B	O	15-B	62,00 1,0138	61,98 1,0140	61,995 1,0138	-	-	-0,00022	веће од - 150
1B	A	15-B	62,03 1,0135	62,00 1,0138	61,98 1,0140	-	-	+0,00310	+520
1P	P	15-P	61,88 1,0149	61,93 1,0144	61,93 1,0144	-	-	-0,00154	-250
1P	O	15-P	61,89 1,0148	61,89 1,0148	61,93 1,0144	-	-	-0,00269	-440
1P	A	15-P	61,91 1,0146	61,905 1,0147	61,905 1,0147	-	-	-0,00049	веће од - 150
2B	P	14,5-B	61,81 1,0156	61,84 1,0153	61,90 1,0147	-	-	-0,00334	-550
2B	O	14,5-B	61,88 1,0149	61,88 1,0149	61,95 1,0142	-	-	-0,00266	-440
2B	A	14,5-B	61,965 1,0141	61,93 1,0144	61,905 1,0147	-	-	0,00246	+360
2P	P	14,5-P	61,87 1,0150	61,89 1,0148	61,925 1,0145	-	-	-0,00121	-200
2P	O	14,5-P	61,89 1,0148	61,94 1,0143	61,96 1,0141	-	-	-0,00167	-280
2P	A	14,5-P	61,94 1,0143	61,94 1,0143	61,99 1,0139	-	-	0,00172	-280

Наставак табеле 3.5.

УЗОРАК	ПРАВАЦ	Ψ [°]	0	15	30	40	45	$\text{tg}\alpha$ [10 ⁻⁸ m]	σ_p [MPa]
		$\sin^2\Psi$	0	0,067	0,250	0,413	0,50		
		ϕ/ϕ_1	θ [°] ; d [10 ⁻⁸ m]						
3B	P	14-B	61,82 1,0155	61,85 1,0152	61,90 1,0147	61,95 1,0142	-	-0,00306	-500
3B	O	14-B	61,93 1,0144	61,91 1,0146	61,92 1,0143	61,92 1,0145	-	-0,00006	веће од - 150
3B	A	14-B	61,87 1,0150	61,86 1,0151	61,93 1,0157	61,70 1,0166	-	0,00388	+640
3P	P	14-P	61,93 1,0144	61,92 1,0145	61,93 1,0144	-	-	-0,00033	веће од - 150
3P	O	14-P	61,86 1,0151	61,87 1,0150	61,93 1,0144	-	-	-0,00233	-380
3P	A	14-P	61,83 1,0154	61,82 1,0155	61,90 1,0147	-	-	-0,00255	-420
3.1	P	12-M	61,84 1,0153	61,87 1,0150	61,88 1,0149	61,94 1,0143	-	-0,00214	-350
3.1	O	12-M	61,85 1,0152	61,95 1,0152	61,93 1,0151	61,90 1,0147	-	-0,00117	-200
3.1	A	12-M	61,92 1,0145	61,92 1,0145	61,82 1,0155	61,86 1,0151	-	+0,00197	+330
3.2	P	10-M	61,93 1,0144	61,92 1,0145	61,93 1,0144	61,95 1,0142	-	-0,00055	веће од - 150
3.2	O	10-M	61,88 1,0149	61,96 1,0141	61,96 1,0141	62,02 1,0136	-	-0,00250	-410
3.2	A	10-M	61,97 1,0141	61,94 1,0144	61,90 1,0147	-	-	+0,00246	+360
3.3	P	8-M	61,91 1,0146	61,86 1,0151	61,88 1,0149	61,85 1,0152	-	+0,00097	+160

Наставак табеле 3.5.

УЗОРАК	ПРАВАЦ	Ψ [°]	0	15	30	40	45	tg α [10 ⁻⁸ m]	σ _y [MPa]
		sin ² Ψ	0	0,067	0,250	0,413	0,50		
		φ/φ ₁	θ [°] ; d [10 ⁻⁸ m]						
3.3	O	8-M	61,83 1,0154	61,88 1,0149	61,93 1,0144	61,85 1,0144	-	-0,00230	-380
3.3	A	8-M	61,96 1,0141	61,98 1,0140	61,95 1,0142	61,95 1,0142	-	+0,00040	мање од + 150
2.1	P	41-B	61,92 1,0145	61,91 1,0146	62,06 1,0132	62,18 1,0121	-	-0,00625	-1030
2.1	O	41-B	61,92 1,0145	61,98 1,0140	62,05 1,0133	62,19 1,0120	-	-0,00570	-940
2.1	A	41-B	61,92 1,0145	61,83 1,0154	61,86 1,0151	61,75 1,0161	-	+0,00293	+480
2.2	P	30-B	61,86 1,0156	61,86 1,0151	61,95 1,0142	62,02 1,036	-	-0,00477	-790
2.2	O	30-B	61,86 1,0151	61,83 1,0154	61,80 1,0157	61,77 1,0159	-	+0,00182	+300
2.2	A	30-B	61,77 1,0159	61,72 1,0164	61,72 1,0164	-	-	+0,00158	+260
2.3	P	24-B	61,97 1,0140	61,90 1,0147	61,88 1,0149	-	61,77 1,0159	-0,00330	-550
2.3	O	24-B	61,99 1,0139	61,96 1,0141	61,94 1,0143	61,97 1,0141	61,99 1,0139	+0,00006	мање од + 150
2.3	A	24-B	61,99 1,0139	61,95 1,0142	61,94 1,0143	-	-	+0,00172	+280
2.4	P	14,5-B	61,87 1,0150	61,90 1,0147	61,91 1,0146	61,95 1,0142	-	-0,00169	-280
2.4	O	14,5-B	61,87 1,0150	61,89 1,0148	61,96 1,0141	62,02 1,0136	-	-0,00345	-570
2.4	A	14,5-B	61,96 1,0141	61,91 1,0146	61,85 1,0152	61,82 1,0155	-	+0,00325	+540

Угао θ се учитава са тачношћу $0,02^\circ$. Положај максимума ("пика") се може одредити са тачношћу $0,05^\circ$. Како је $d = d(K_\alpha, \theta)$, то се, имајући у виду $\theta = 62^\circ$ и расипање експерименталних тачака (грешка при утврђивању линеарне регресије), коначне вредности напона σ_ϕ утврђује са тачношћу ± 150 МПа. Стога су све вредности $|\sigma_\phi| < 150$ МПа у претходној табели посебно истакнуте.

Обзиром на високу вредност грешке мерења свих компоненти заосталих напона, може се говорити само о приближним вредностима. Међутим, могу се уочити одређени карактеристични односи између компоненти и њихове промене у зависности од порекла узорка и припреме њихове површине:

- Присуство радијалних напона у полазним топловаљаним шипкама који настају као последица хлађења и који су идентификовани у раду [19]. Знатно веће вредности напона у овим експериментима могу се објаснити тиме што је у [19] било примењено дубље нагризање површине.
- Радијални напони су притисни и мењају се различито код вучених узорака
 - а) док је код узорка 1В $|\sigma_\phi| < 150$ МПа, дотле код узорка 2В и 3В она достиже ≈ 500 МПа;
 - б) код узорака 2.1 - 2.4 највеће вредности напона су код највећег пречника (1030 МПа) и смањују се до 280 МПа код пречника 14,5 mm;
- Обимни напони у вученом стању имају негативан знак код најмањих и највећих пречника и веома су компаративни са радијалним напонима, док су код шипки средњег пречника позитивни и компаративни са аксијалним напонима;
- Аксијални напони у вученим шипкама су позитивни и имају вредности у интервалу $260 \div 640$ МПа са тешко раздвојивим утицајима појединих параметара;
- Равнање значајно утиче на аксијалне напоне превodeћи их у негативне вредности, а остале напонске компоненте редукује у односу на вучено стање, тако да се добију негативне вредности све три компоненте напона, са тенденцијом међусобног приближавања;
- Машинска обрада стругањем мења заостале напоне и то:
 - а) радијални напони се смањују по интензитету прелазећи на крају у позитивне вредности у области блиској грешци мерења,
 - б) обимни напони се повећавају по интензитету,
 - в) аксијални напони се неутралишу (смањују) улазећи у област грешке мерења.

Значи, равнање и машинска обрада стругањем смањују интензитете заосталих напона насталих вучењем.

Уочене промене су у сагласности са препознатљивим карактеристикама наведеним у теоријском делу. Ипак, без обзира на њихову очигледност код радијалних и аксијалних напона, а углавном и код обимних, потребно је истаћи да у примени методе рентгенске дифракције код оваквих комада (којој претходе поступци деформације и/или резања) долази до пуног изражаја утицај површине узорка. Наиме, површина код завршне обраде је веома осетљива на промену било којег од мноштва утицајних параметара. То значи да ће постојати могућност да резултати садрже у себи и удео напона који настаје у припреми самог узорка за испитивање чији су ефекти најизразитији на самој површини. Раздвајање ових утицаја, односно напона, није увек могуће, па се и поред допунских испитивања, тачност не може значајније подићи.

3.6.3 Испитивање методом дифлекције

3.6.3.1 Резултати мерења и математичка обрада еластичне линије за вучено и жарено стање

Резултати мерења растојања између меридијалних површина раздвојених половина узорка после уклањања заковичног споја приказани су у табели 3.6. При томе су ознаке усклађене са сликом 3.1b, а упоредо су, ради прегледности, поновљени подаци за вучење и накнадну обраду узорка. Ознаке у табели су следеће:

- Помак [z] - растојање од осе заковичног споја до места мерења размака [mm];
- Размак [2 · y] - растојање између меридијалних површина половина узорка после уклањања заковичне везе [mm];
- Φ_0 - улазни пречник шипке у вучну матрицу [mm];
- Φ_v - излазни пречник шипке из вучне матрице [mm];
- Φ_1 - редуковани пречник, пречник који је после вучења смањен поступком обраде резањем на стругу [mm];
- r - излазни или редуковани полупречник [mm];
- СМ - стање материјала узорка: вучено/жарено (1 сат на 390 C);
- МЗ - коришћено мазиво у процесу вучења;
- БВ - брзина вучења [m/s];
- СКГ - средња квадратна грешка мерења и апроксимације [mm];
- z_n - релативни помак у односу на укупну дужину узорка ($z_n = z/L$).

Табела 3.6 Резултати мерења растојања између меридијалних равни код испитиваних узорка

УЗОРАК	Материјал		Φ_0		Φ_v		СМ		МЗ		БВ	
1	Č.1221		16		15		вучено		уље		0,35	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	0	0,80	2,00	3,64	5,80	8,40	11,40	14,84	18,90	23,40	-	
2	Č.1221		16		15		вучено		уље		0,35	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	0	0,64	1,56	3,04	5,04	7,56	10,54	14,28	18,54	23,18	-	

Наставак табеле 3.6

УЗОРАК	Материјал		ϕ_o		ϕ_v		CM		MЗ		БВ	
2	Č.1221		16		15		жарено		уље		0,35	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	0	0,30	1,00	1,96	3,10	4,72	6,50	9,10	11,70	14,80	-	
3	Č.1221		16		14,5		вучено		уље		0,35	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	0	0,18	0,80	2,20	4,00	5,96	8,60	11,56	15,10	18,86	23,02	
4	Č.1221		16		14		вучено		уље		0,35	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	0	0,30	0,96	2,08	3,54	5,60	8,02	10,80	14,10	17,66	21,72	
5	Č.4121		16		14		вучено		уље		0,35	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	0	0,60	1,10	2,30	3,80	5,50	7,76	10,20	12,76	15,80	19,20	
6	Č.4721		32		30		вучено		паста		0,35	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	0	0,40	1,00	1,80	2,70	3,94	5,44	7,26	9,16	11,30	13,40	
6	Č.4721		32		30		жарено		паста		0,35	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	0	0,26	0,64	1,46	2,02	2,90	4,06	5,24	6,76	8,34	10,18	
7	Č.4121		32		30		вучено		паста		0,35	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	0	0,60	1,40	2,10	3,42	4,90	6,52	8,56	10,70	13,44	16,24	

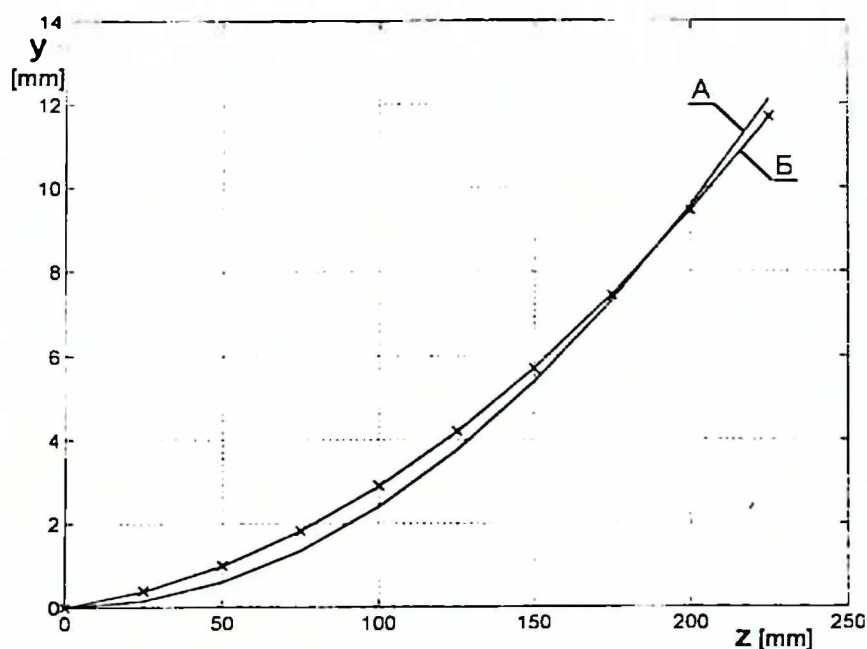
Наставак табеле 3.6

УЗОРАК	Материјал		$\phi_{\text{н}}$		$\phi_{\text{в}}$		СМ		МЗ		БВ	
7	Č.4121		32		30		жарено		паста		0,35	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	0	0,46	0,80	1,60	2,566	3,60	4,80	5,24	7,84	9,74	11,78	
8	Č.1221		32		30		вучено		уље		0,35	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	0	0,60	1,18	1,90	3,12	4,40	5,80	7,58	9,50	11,70	14,06	
8	Č.1221		32		30		жарено		уље		0,35	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	0	0,48	0,90	1,66	2,48	3,46	4,50	5,90	7,64	9,10	10,91	
9	Č.4721		32		30		вучено		уље		0,35	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	0	0,60	1,20	2,10	3,24	4,50	6,08	7,90	9,98	12,36	14,94	
10	Č.4121		42		40		вучено		паста		0,12	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	0	0,60	1,10	1,80	2,90	3,76	5,04	6,82	8,56	10,30	12,30	
11	Č.4121		42		40		вучено		паста		0,12	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	1,06	1,50	2,10	3,10	4,10	5,22	6,56	8,10	9,72	11,58	13,44	
11	Č.4121		42		40		жарено		уље		0,12	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК	1,00	1,42	2,00	2,66	3,54	4,60	5,62	6,84	8,30	9,70	11,36	

Резултати приказани у табели су прерачунати на вредности за еластичну линију и графички илустровани на сликама од 3.17 до 3.27, где су упоредно приказани и резултати добијени по моделним једначинама, на основу обраде експерименталних резултата. Провера могућности апроксимације добијених зависности вредности y од z је у коначном разматрању определила једначине облика:

$$y = a_1 z_n^2 \quad \text{и} \quad y = a_2 z_n + a_3 z_n^2.$$

Коефицијенти a_i су одређени минимизацијом средњег квадратног одступања измерених и прорачунатих вредности СКГ. Прорачунате вредности y по овим једначинама приказане су упоредо са измереним - на сликама 3.17 - 3.27. У табелама које су дате упоредо са сликама приказани су коефицијенти у једначинама, средња квадратна грешка апроксимације (СКГ) и бројна вредност другог извода еластичне линије (d^2y/dz^2). Ради поједностављења облик једначине $y = a_1 z_n^2$ је означен као модел А, а облик $y = a_2 z_n + a_3 z_n^2$ као модел Б.



Слика 3.17 - Упоредње резултата за еластичну линију

УЗОРАК 1 - вучено

x - измерена вредност

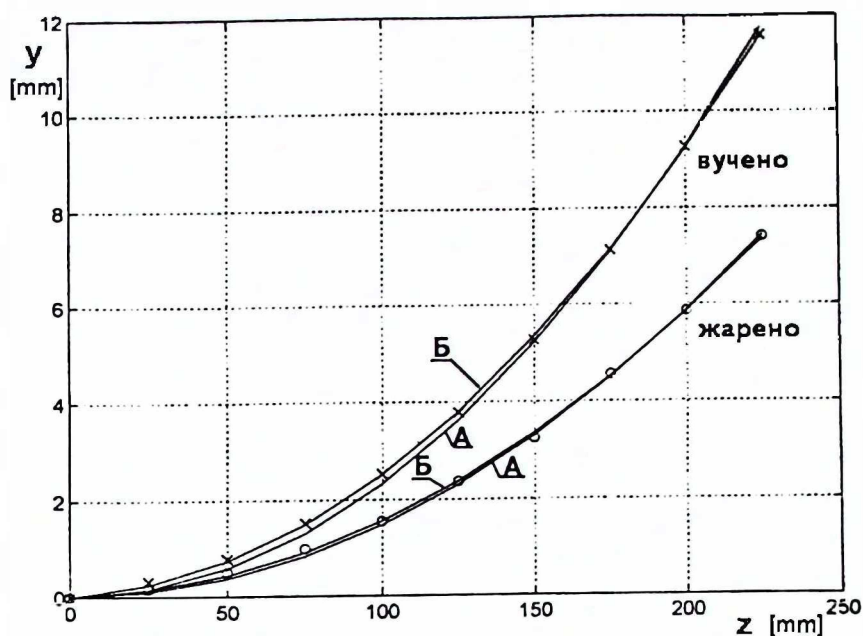
А - прорачунато по једначини:

$$y = a_1 z_n^2$$

Б - прорачунато по једначини:

$$y = a_2 z_n + a_3 z_n^2$$

Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2y}{dz^2}$	Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2y}{dz^2}$
$y = 14,96 \cdot z_n^2$	0,62	$4,79 \cdot 10^{-4}$	$y = 2,62 \cdot z_n + 11,49 \cdot z_n^2$	0,01	$3,68 \cdot 10^{-4}$



Слика 3.18 - Упоређење резултата за еластичну линију

**УЗОРАК 2 - вучено
- жарено**

x - измерена вредност

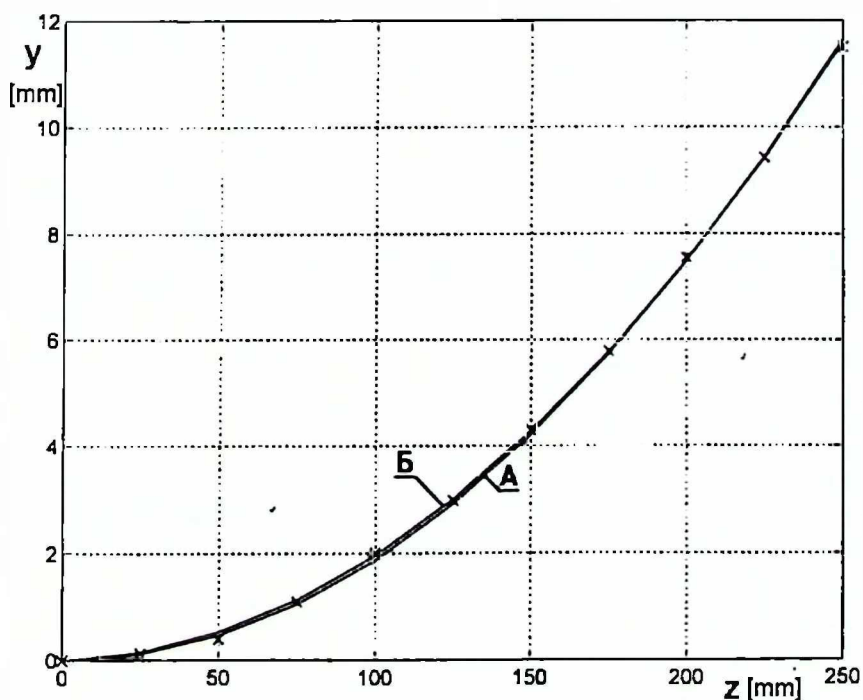
A - прорачунато по једначини:

$$y = a_1 z_n^2$$

B - прорачунато по једначини:

$$y = a_2 z_n + a_3 z_n^2$$

Стање	Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$	Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$
вучено	$y = 14,50 \cdot z_n^2$	0,29	$4,64 \times 10^{-4}$	$y = 1,04 \cdot z_n + 13,13 \cdot z_n^2$	0,03	$4,20 \times 10^{-4}$
жарено	$y = 9,19 \cdot z_n^2$	0,14	$2,94 \times 10^{-4}$	$y = 0,47 \cdot z_n + 8,57 \cdot z_n^2$	0,02	$2,74 \times 10^{-4}$



Слика 3.19 - Упоређење резултата за еластичну линију

УЗОРАК 3 - вучено

x - измерена вредност

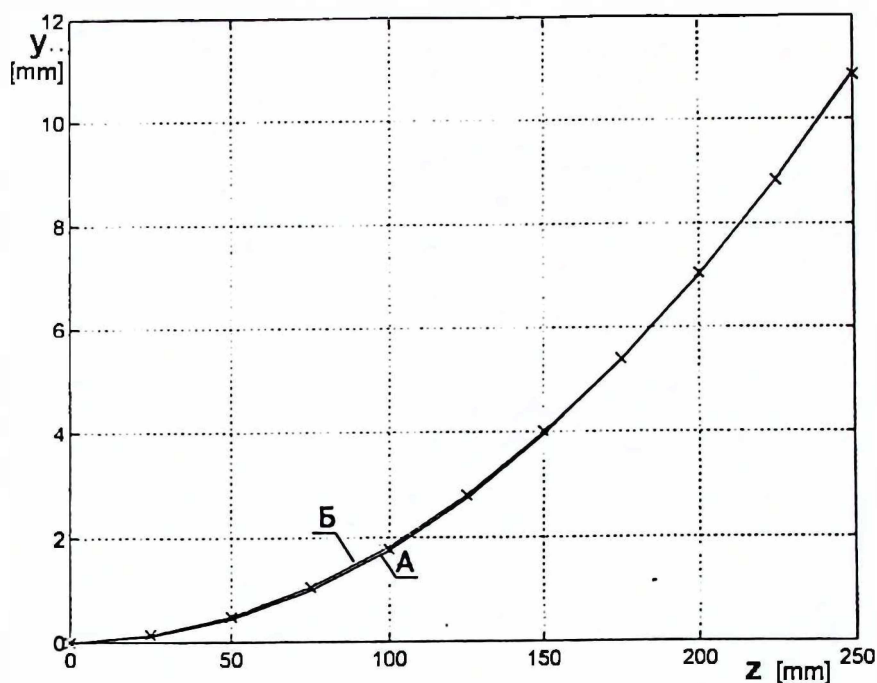
A - прорачунато по једначини:

$$y = a_1 z_n^2$$

B - прорачунато по једначини:

$$y = a_2 z_n + a_3 z_n^2$$

Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$	Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$
$y = 11,66 \cdot z_n^2$	0,09	$3,73 \times 10^{-4}$	$y = 0,43 \cdot z_n + 11,15 \cdot z_n^2$	0,03	$3,57 \times 10^{-4}$



Слика 3.20 - Упоређење резултата за еластичну линију

УЗОРАК 4 - вучено

x - измерена вредност

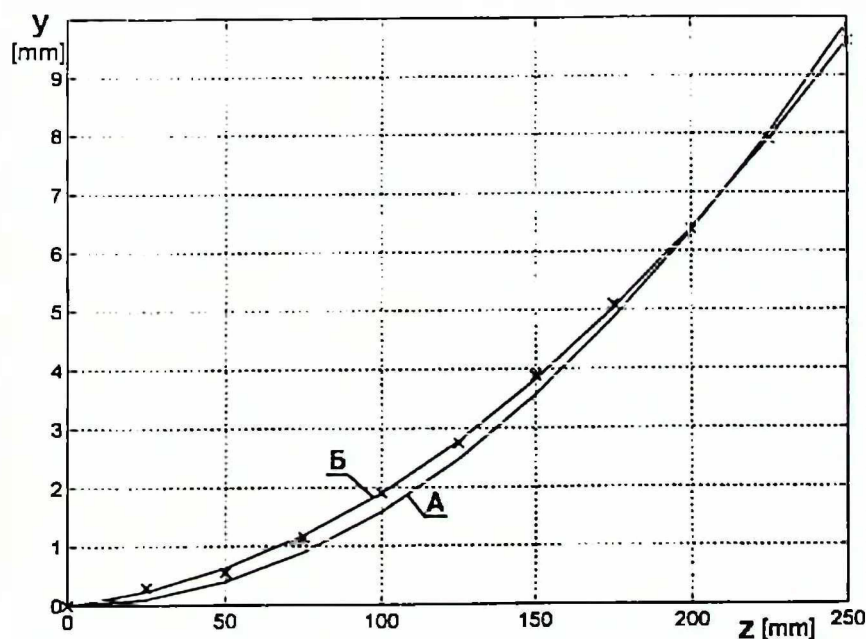
А - прорачунато по једначини:

$$y = a_1 z_n^2$$

Б - прорачунато по једначини:

$$y = a_2 z_n + a_3 z_n^2$$

Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$	Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$
$y = 10,94 \cdot z_n^2$	0,08	$3,50 \times 10^{-4}$	$y = 0,31 \cdot z_n + 10,57 \cdot z_n^2$	0,002	$3,38 \times 10^{-4}$



Слика 3.21 - Упоређење резултата за еластичну линију

УЗОРАК 5 - вучено

x - измерена вредност

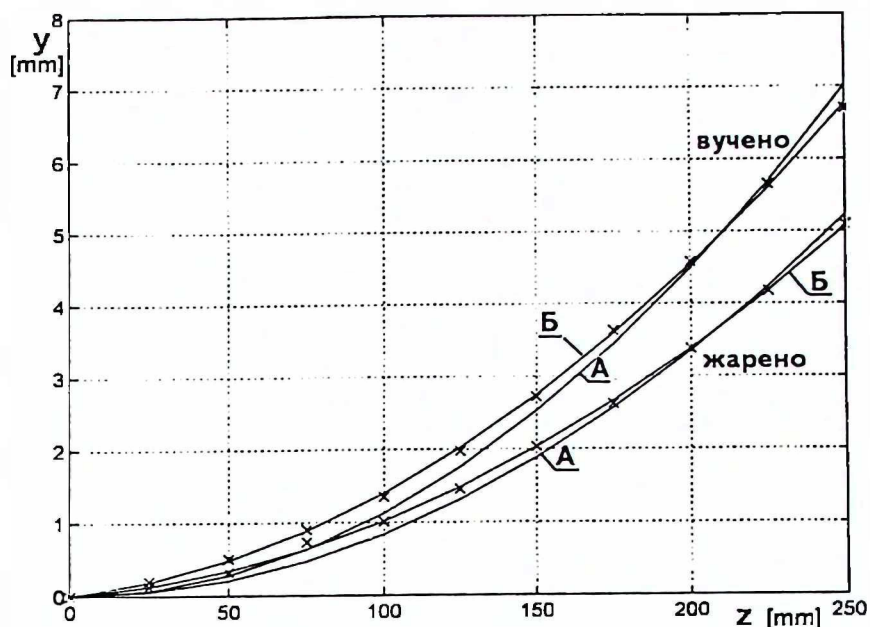
А - прорачунато по једначини:

$$y = a_1 z_n^2$$

Б - прорачунато по једначини:

$$y = a_2 z_n + a_3 z_n^2$$

Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$	Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$
$y = 9,91 \cdot z_n^2$	0,43	$3,17 \times 10^{-4}$	$y = 1,52 \cdot z_n + 8,09 \cdot z_n^2$	0,003	$2,59 \times 10^{-4}$



Слика 3.22 Упоређење резултата за еластичну линију

**УЗОРАК 6 - вучено
- жарено**

x - измерена вредност

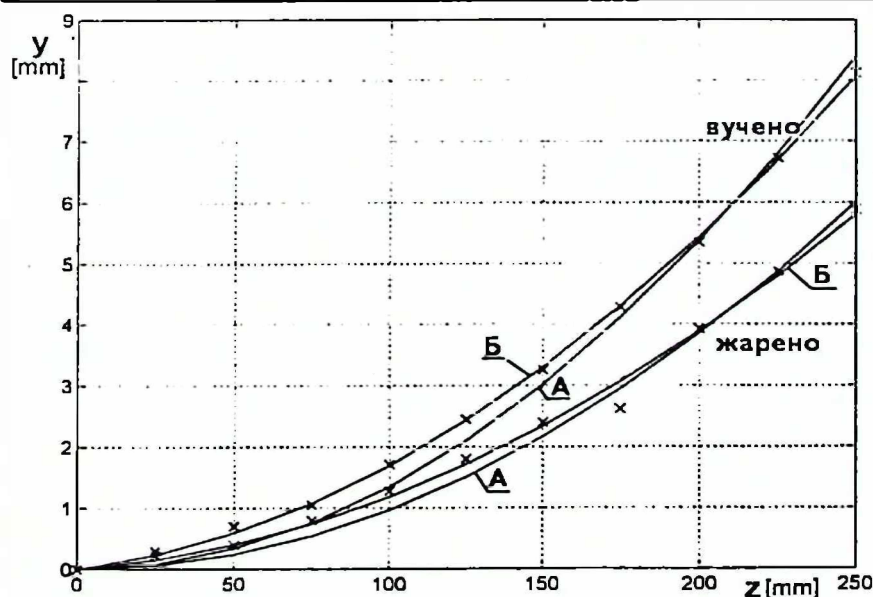
А - прорачунато по једначини:

$$y = a_1 z_n^2$$

Б - прорачунато по једначини:

$$y = a_2 z_n + a_3 z_n^2$$

Стање	Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$	Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$
вучено	$y = 7,02 \cdot z_n^2$	0,37	$2,25 \times 10^{-4}$	$y = 1,30 \cdot z_n + 5,46 \cdot z_n^2$	0,003	$1,75 \times 10^{-4}$
жарено	$y = 5,23 \cdot z_n^2$	0,25	$1,76 \times 10^{-4}$	$y = 0,85 \cdot z_n + 4,21 \cdot z_n^2$	0,006	$1,35 \times 10^{-4}$



Слика 3.23 - Упоређење резултата за еластичну линију

**УЗОРАК 7 - вучено
- жарено**

x - измерена вредност

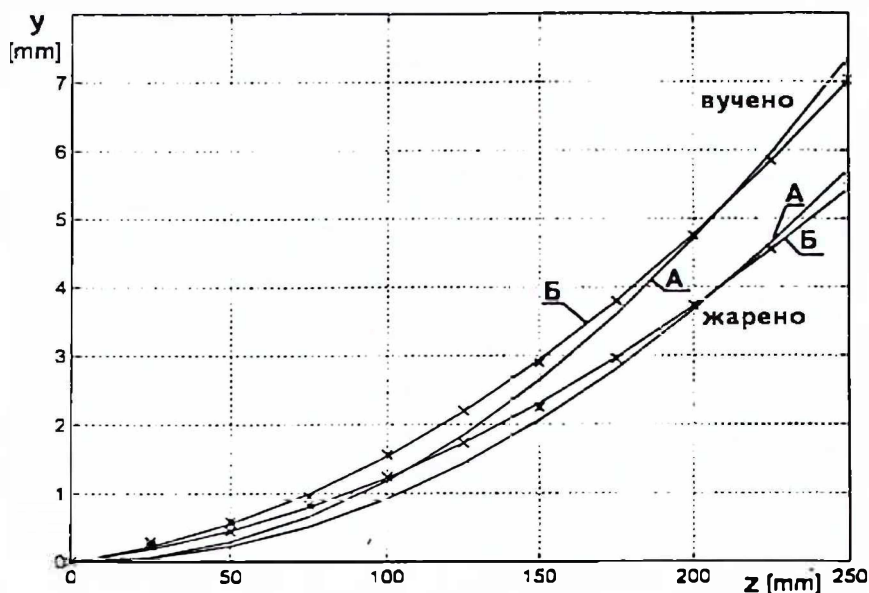
А - прорачунато по једначини:

$$y = a_1 z_n^2$$

Б - прорачунато по једначини:

$$y = a_2 z_n + a_3 z_n^2$$

Стање	Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$	Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$
вучено	$8,40 \cdot z_n^2$	0,51	$2,69 \times 10^{-4}$	$y = 1,67 \cdot z_n + 6,41 \cdot z_n^2$	0,04	$2,05 \times 10^{-4}$
жарено	$6,01 \cdot z_n^2$	0,34	$1,92 \times 10^{-4}$	$y = 1,03 \cdot z_n + 4,79 \cdot z_n^2$	0,04	$1,53 \times 10^{-4}$



Слика 3.24 - Упоређење резултата за еластичну линију

**УЗОРАК 8 - вучено
- жарено**

x - измерена вредност

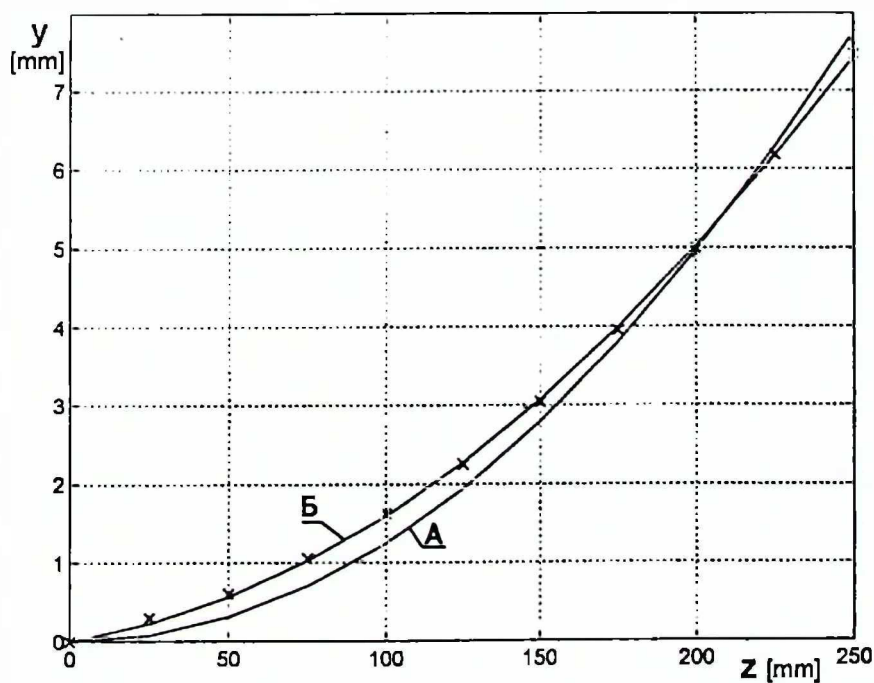
А - прорачунато по једначини:

$$y = a_1 z_n^2$$

Б - прорачунато по једначини:

$$y = a_2 z_n + a_3 z_n^2$$

Стање	Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$	Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$
вучено	$y = 7,35 \cdot z_n^2$	0,51	$2,35 \times 10^{-4}$	$y = 1,72 \cdot z_n + 5,30 \cdot z_n^2$	0,02	$1,69 \times 10^{-4}$
жарено	$y = 5,73 \cdot z_n^2$	0,44	$1,83 \times 10^{-4}$	$y = 1,46 \cdot z_n + 3,98 \cdot z_n^2$	0,018	$1,27 \times 10^{-4}$



Слика 3.25 - Упоређење резултата за еластичну линију

УЗОРАК 9 - вучено

x - измерена вредност

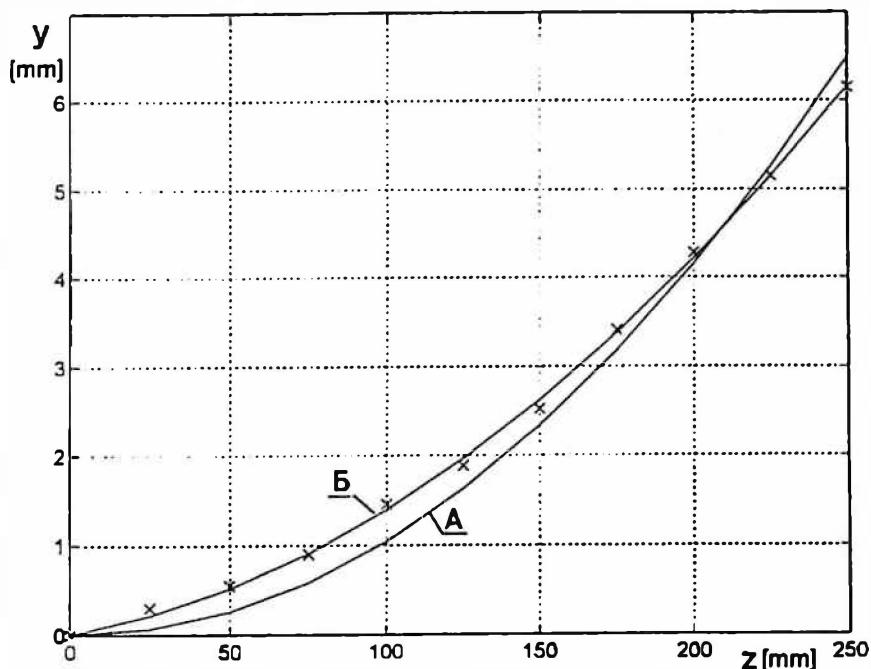
А - прорачунато по једначини:

$$y = a_1 z_n^2$$

Б - прорачунато по једначини:

$$y = a_2 z_n + a_3 z_n^2$$

Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$	Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$
$y = 7,57 \cdot z_n^2$	0,51	$2,48 \times 10^{-4}$	$y = 1,66 \cdot z_n + 5,77 \cdot z_n^2$	0,03	$1,85 \times 10^{-4}$



Слика 3.26 - Упоређење резултата за еластичну линију

УЗОРАК 10 - вучено

x - измерена вредност

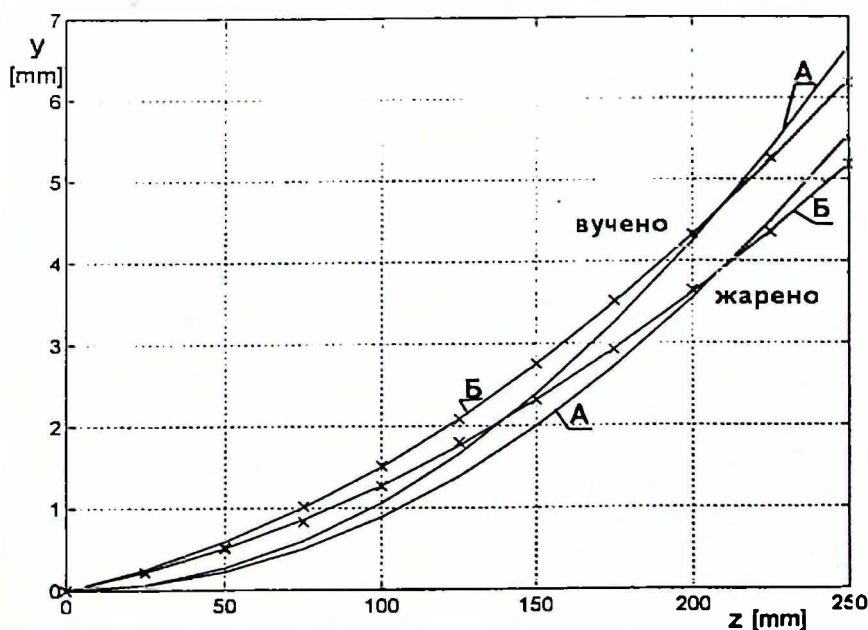
А - прорачунато по једначини:

$$y = a_1 z_n^2$$

Б - прорачунато по једначини:

$$y = a_2 z_n + a_3 z_n^2$$

Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$	Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$
$y = 6,49 \cdot z_n^2$	0,50	$2,01 \times 10^{-4}$	$y = 1,68 \cdot z_n + 4,49 \cdot z_n^2$	0,026	$1,44 \times 10^{-4}$



Слика 3.27 - Упоређење резултата за еластичну линију

УЗОРАК 11 - вучено - жарено

x - измерена вредност

А - прорачунато по једначини:

$$y = a_1 z_n^2$$

Б - прорачунато по једначини:

$$y = a_2 z_n + a_3 z_n^2$$

Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$	Једначина еластичне линије	СКГ	$\frac{d^2 y}{dz^2}$
$y = 6,64 \cdot z_n^2$	0,59	$2,12 \times 10^{-4}$	$y = 2,12 \cdot z_n + 4,11 \cdot z_n^2$	0,018	$1,31 \times 10^{-4}$
$y = 5,55 \cdot z_n^2$	0,53	$1,78 \times 10^{-4}$	$y = 1,89 \cdot z_n + 3,32 \cdot z_n^2$	0,006	$1,06 \times 10^{-4}$

Оцена примењених модела за апроксимацију еластичних линија узорака

Математички модел облика **Б** много боље апроксимира експерименталне резултате од модела **А**. То јасно илуструје средња квадратна грешка која је код примене модела **Б** за један до два реда величине нижа од грешке код модела **А**.

Поред овога, могуће је извршити и упоредну оцену примењених модела у односу на грешку самог мерења. Код примене модела **А**, средња квадратна грешка апроксимације најчешће је већа од средње квадратне грешке мерења, док је у случају модела **Б** грешка апроксимације значајно мања од грешке мерења. Овај закључак издваја примену модела **Б** као веома прецизну апроксимацију експерименталних резултата.

У вези са претходним, поставља се питање физичке интерпретације изабраног модела. Наиме, физичке претпоставке примењене методе у спроведеном експерименту подразумевају константан аксијални заостали напон и понашање нераскинутог заковичног споја као укљештења за раздвојене половине узорка. То упућује на механички модел конзоле са константним моментним оптерећењем. Овакав модел оптерећења има еластичну линију облика квадратне параболе са само квадратним чланом, управо истог математичког облика као што је модел **А** чије је одступање од експерименталних резултата већ истакнуто. Додавање линеарног члана код модела **Б**, се може објаснити одступањем понашања осе заковичне везе од идеалног укљештења. Због реалности споја који је остварен помоћу пресовања заковице, а нарочито као последица спроведених пластичних деформација над узорком, долази до лабављења заковичне везе. Као последица лабављења везе, јавља се нагиб на самом почетку конзоле ($z = 0$) и он је бројно једнак коефицијенту уз линеарни члан код модела **Б**.

Постојање нагиба (половине) узорка у оси нераскинутог заковичног споја ($z = 0$) доводи до знатнијег одступања од измерених размака ($y_{\text{експ}}$) у области малих вредности z , док код виших вредности z квадратни члан постаје доминантан по вредности.

За коначно оцену уведених претпоставки за усвојени модел **Б**, потребно је анализирати утицај лабављења везе на еластичну линију у области ($z \geq 0$). Наиме, у полазу се подразумева да је нераскинути део узорка ($z < 0$) потпуно уравнотежен сопственим унутрашњим (заосталим) напонима и практично не учествује у ефектима раскинутог дела. Међутим, уколико долази до знатнијег лабављења везе, поред релаксације у области $z \geq 0$, доћи ће до релаксације и са друге стране разлабављене везе ($z < 0$), па ће и тај део активно учествовати у обликовању посматране еластичне линије.

Модел **Б**, дакле, једначина са квадратним и линеарним чланом узима у обзир недостатке модела **А** за интерпретацију стварно измерене еластичне линије. Квадратни члан представља компоненту угиба створеног услед спрега резултантних аксијалних сила (насталих из заосталих напона у подужном правцу), док линеарни члан представља утицај несавршености укљештења на еластичну линију, односно одређује учешће нагиба у укљештењу услед ослобођених напона у области ($z < 0$).

Разлике у коефицијентима модела **А** и **Б**

Већ је уочено да први модел полази од идеалног укљештења, док други узима у обзир ефекат лабављења везе на облик еластичне линије. Према томе, разлике између коефицијената (уз квадратне чланове) ће бити утолико мање уколико су мање вредности коефицијената уз линеарне чланове.

У сваком случају, потребно је настојати да се приликом извођења експеримента одржи непопустљивост заковичне везе, што ће се најбоље очитовати из малих вредности коефицијената уз линеарни члан (a_2 - коефицијенти). Коефицијенти a_1 и a_3 су значајни јер одређују величине другог извода, односно кривине савијеног штапа на основу којих се одређује његово моментно и напонско оптерећење. Због тога је у свим случајевима издвојена вредност другог извода. Међутим, знатно потпунија слика ефеката различитих утицајних параметара из програма примене методе дифлекције биће презентирана након упознавања осталих параметара који утичу на заостале напоне. Засада се може истаћи да се еластична линија мења у зависности од:

- полазног/излазног пречника шипке,
- врсте материјала,
- мазива у процесу вучења,

с тим, што је утицај пречника изражен, док су утицаји остала два фактора евидентни, али ипак знатно мањи.

3.6.3.2 Резултати мерења и математичке обраде еластичне линије за стање после стругања узорака

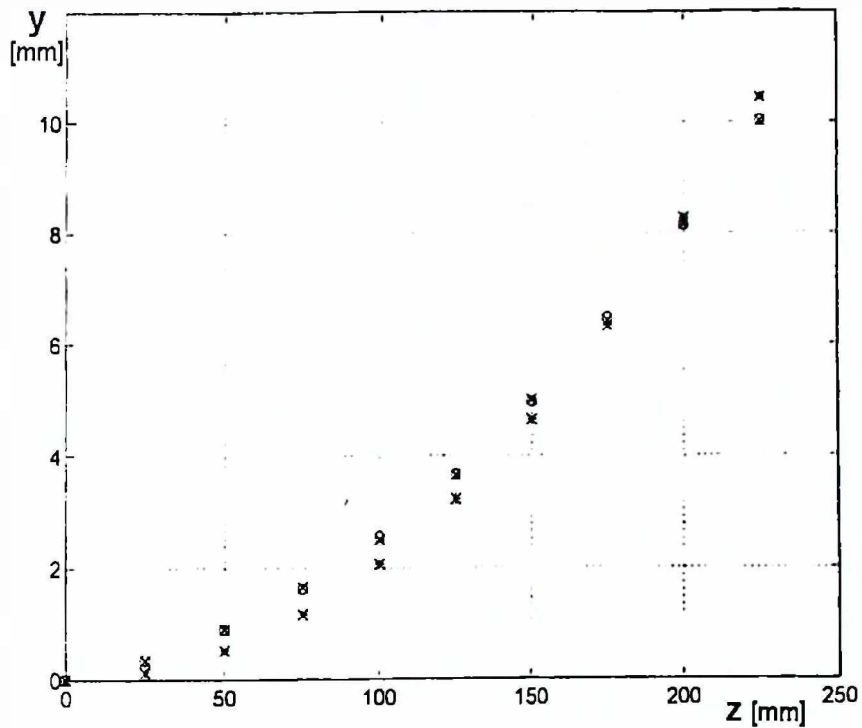
Испитивања, која су имала за циљ одређивање понашања узорака са формираним заосталим напонима вучењем после стругања површине, спроведена су на узорцима 1, 9 и 10 по методологији описаној у поглављу 3.4.5. Код сва три узорка је примењено 9 пролаза са практично константном дебљином скинутог слоја у сваком пролазу (0,4 mm код узорка 1; 1,8 mm код узорка 9 и 2,4 mm код узорка 10). После сваког пролаза понављана је процедура растављања заковичног споја и мерења растојања између меридијалних равни растављених половина узорака (размака). Резултати таквог мерења су преведени на податке за дефинисање еластичне линије, а затим је извршена апроксимација једначинама по моделима А и Б, као код вученог и жареног стања. Поступак одређивања коефицијената у једначинама је такође спроведен на основу минимизације средњег квадратног одступања (СКГ).

Измерене вредности, коефицијенти у једначинама, СКГ и други извод за комплетни програм испитивања су приказани у табели 3.7. Ознаке у табели су аналогне ознакама у табели 3.6. Упоређење резултата измерених и прорачунатих еластичних линија добијених по моделним једначинама А и Б за узорке 1 и 9 приказани су на сликама 3.28 и 3.29 и то за пречнике после првог и последњег пролаза.

Модел Б је и у овом случају задржао високу прецизност апроксимације што га афирмише као поуздано тачан модел за прорачун еластичне линије у свим условима дораде узорака са формираним заосталим напонима.

У циљу бољег сагледавања могућности апроксимације по моделу А на слици 3.30 приказани су упоредни резултати код узорка 10 за вучено стање и стање после редукције до средњег, односно најмањег полупречника. На поменутој слици моделне једначине су приказане континуалним графицима. Уочава се разлика између кривих по моделима А и Б, код вученог стања (полупречник 20 mm) за помак од 25 до 200 mm, а та разлика је највећа код положаја $z = 100$ mm. Потпуно исти карактер разилажења линија је присутан и код полупречника 15, 5 и 10,3 mm. Пресечна тачка моделних линија је на истом помаку, $z = 225$ mm.

Може се закључити да се полазне непрецизности у примени методе преносе и одржавају и у каснијим фазама. Такође је препознатљиво да средња квадратна грешка остаје практично константна у сваком новом пролазу што, заједно са закључком о пресецима моделних кривих на истом z - положају, омогућује примену оба модела.



УЗОРАК - 1

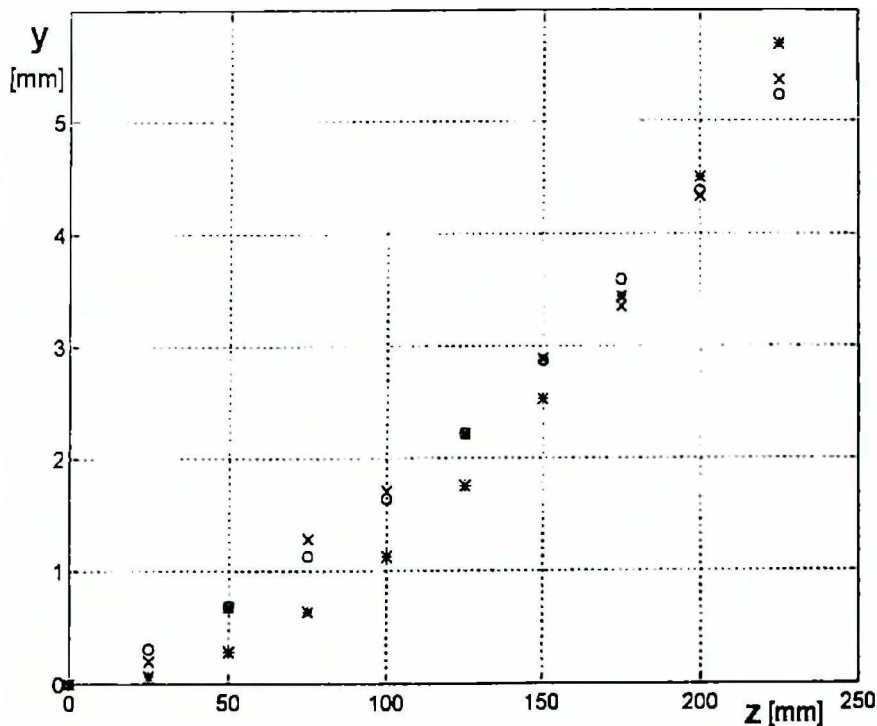
$$\phi_1 : 14,6 \text{ [mm]}$$

x - измерено

Модел:

$$o - y = 12,90 \cdot z_n^2$$

$$\bullet - y = 2,55 \cdot z_n + 9,54 \cdot z_n^2$$



УЗОРАК - 1

$$\phi_1 : 11,7 \text{ [mm]}$$

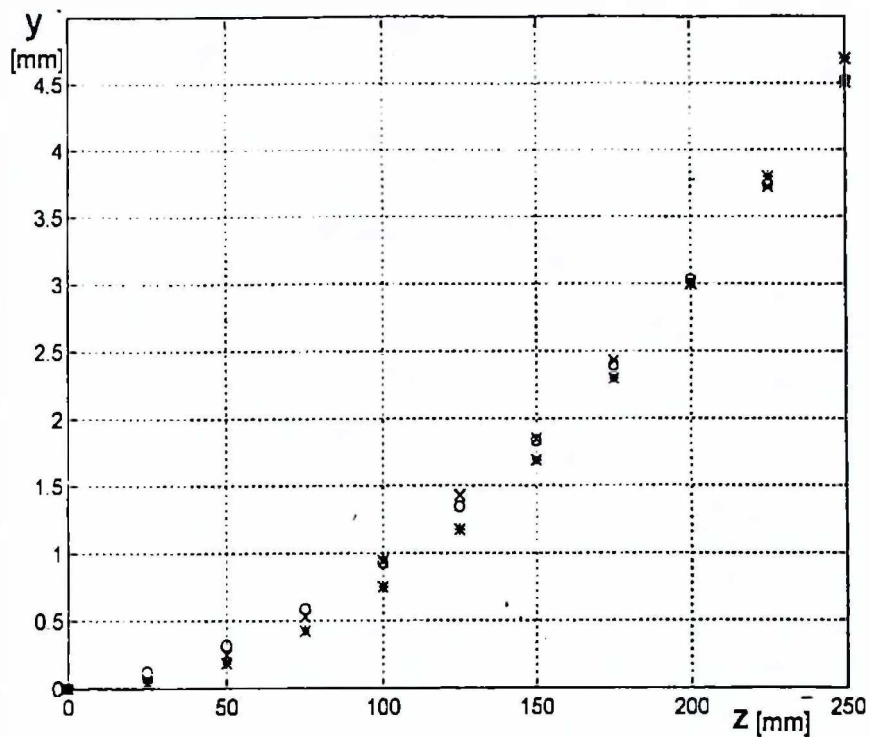
x - измерено

Модел:

$$o - y = 7,03 \cdot z_n^2$$

$$\bullet - y = 2,72 \cdot z_n + 3,43 \cdot z_n^2$$

Слика бр. 3.28 - Вредности за еластичну линију код узорка 1 после првог и последњег стругања (слике горе и доле, респективно) на основу експерименталних резултата и прорачунате по моделима А и Б



УЗОРАК - 9

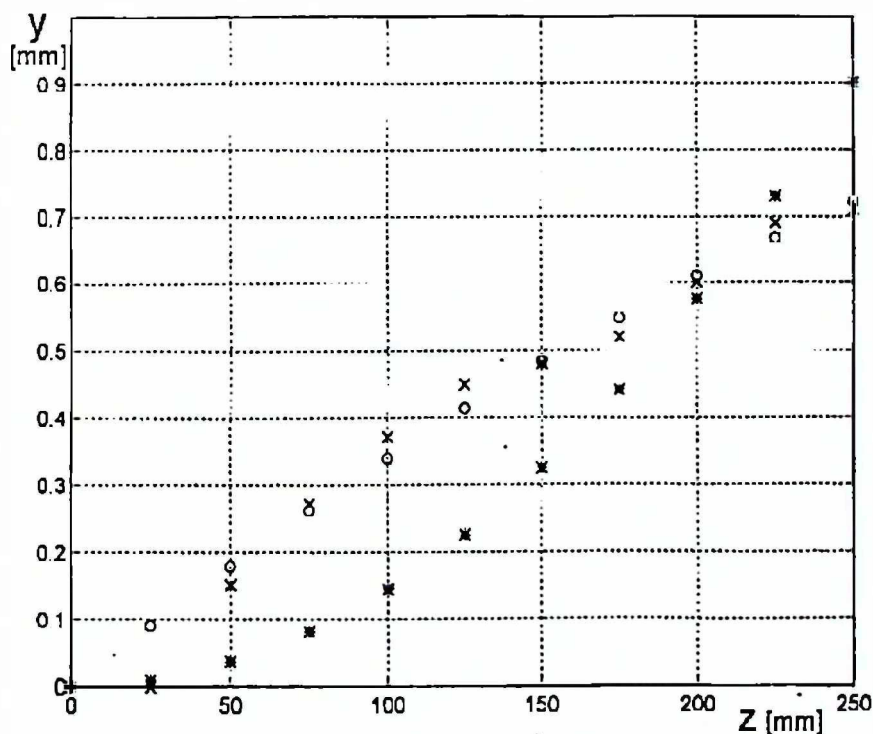
Φ_1 : 22,8 [mm]

x - измерено

Модел:

o - $y = 4,69 \cdot z_n^2$

* - $y = 0,86 \cdot z_n + 3,67 \cdot z_n^2$



УЗОРАК - 9

Φ_1 : 15,5 [mm]

x - измерено

Модел:

o - $y = 0,90 \cdot z_n^2$

* - $y = 0,93 \cdot z_n - 0,21 \cdot z_n^2$

Слика бр. 3.29 - Вредности за еластичну линију код узорка 9 после првог и последњег стругања (слике горе и доле, респективно) на основу експерименталних резултата и прорачунате по моделима А и Б

Табела 3.7 Експериментални резултати за размак и моделне једначине за еластичну линију, средња квадратна грешка и други извод код испитиваних узорака после машинске обраде стругањем

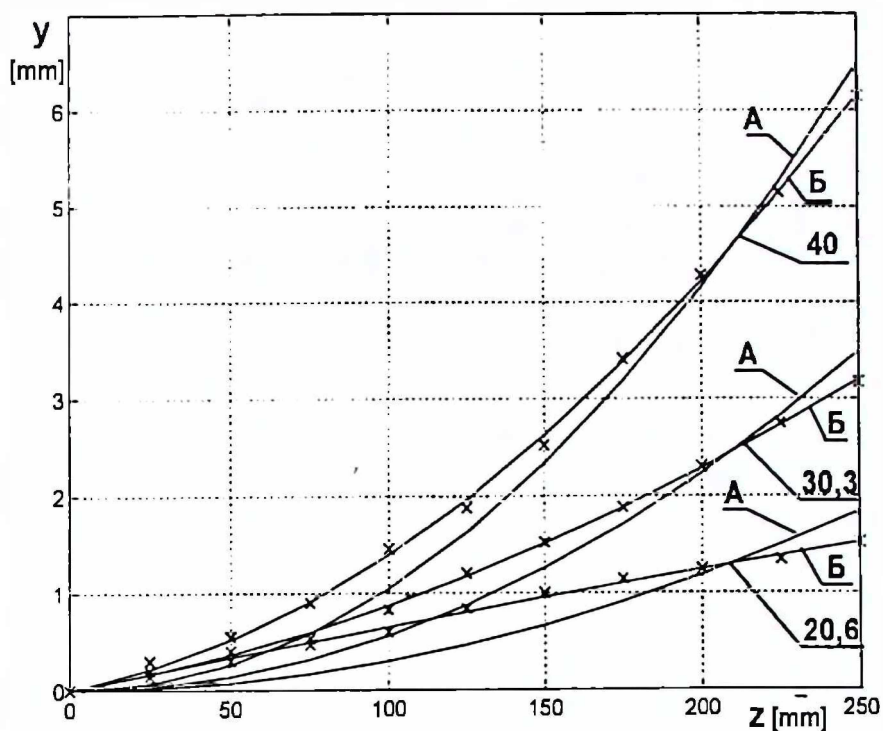
УЗОРАК БРОЈ		Материјал		Φ_0	Φ_v	СМ	МЗ	БВ	
1		Ћ.1221		16	15	вучено	уље	0,35	
Помак →	25	50	75	100	125	150	175	200	225
$\Phi_1 \downarrow$									
14,6	0,7	1,8	3,30	5,00	7,30	10,0	12,84	16,32	20,02
14,2	0,60	1,50	3,04	4,60	6,88	9,20	11,80	14,80	18,24
13,8	0,50	1,40	3,14	4,70	6,56	8,72	11,16	14,00	17,00
13,4	0,50	1,68	3,12	4,60	6,40	8,44	10,66	13,50	16,48
12,9	0,50	1,50	3,00	4,36	6,04	8,10	10,34	13,02	15,90
12,5	0,50	1,50	2,70	3,80	5,00	6,44	8,02	10,18	12,48
12,1	0,44	1,40	2,60	3,54	4,60	5,94	7,30	9,30	11,40
11,7	0,40	1,36	2,56	3,42	4,44	5,78	6,70	8,66	10,74
ПРОРАЧУНАТО ПО МОДЕЛУ									
$y = a_1 \left(\frac{z}{250} \right)^2 = a_1 z_n^2$					$y = a_2 \left(\frac{z}{250} \right) + a_3 \left(\frac{z}{250} \right)^2 = a_2 z_n + a_3 z_n^2$				
Φ_1	Једначина еластичне линије		СКГ	$y'' \cdot 10^4$	Једначина еластичне линије		СКГ	$y'' \cdot 10^4$	
14,6	$y = 12,90 \cdot z_n^2$		0,63	4,13	$y = 2,55 \cdot z_n + 9,54 \cdot z_n^2$		0,002	3,05	
14,2	$y = 11,78 \cdot z_n^2$		0,58	3,77	$y = 2,46 \cdot z_n + 8,53 \cdot z_n^2$		0,021	2,73	
13,8	$y = 11,11 \cdot z_n^2$		0,64	3,56	$y = 2,78 \cdot z_n + 7,44 \cdot z_n^2$		0,041	2,38	
13,4	$y = 10,74 \cdot z_n^2$		0,69	3,44	$y = 2,90 \cdot z_n + 6,92 \cdot z_n^2$		0,018	2,21	
12,9	$y = 10,35 \cdot z_n^2$		0,63	3,31	$y = 2,63 \cdot z_n + 6,88 \cdot z_n^2$		0,017	2,20	
12,5	$y = 8,17 \cdot z_n^2$		0,68	2,61	$y = 2,75 \cdot z_n + 4,53 \cdot z_n^2$		0,050	1,45	
12,1	$y = 7,47 \cdot z_n^2$		0,71	2,38	$y = 2,66 \cdot z_n + 3,96 \cdot z_n^2$		0,007	1,27	
11,7	$y = 7,03 \cdot z_n^2$		0,67	2,25	$y = 2,73 \cdot z_n + 3,43 \cdot z_n^2$		0,002	1,10	

Наставак табеле 3.7

УЗОРАК БРОЈ		Материјал		Φ_0	Φ_v	СМ		МЗ	БВ	
9		Č.4721		32	30	вучено		уље	0,35	
Помак →	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
$\Phi_1 \downarrow$										
28,2	0,20	0,70	1,52	2,68	3,90	5,00	7,30	9,40	11,54	14,00
26,4	0,10	0,60	1,38	2,52	3,78	5,34	7,09	8,94	11,18	13,52
24,6	0,08	0,50	1,12	2,00	3,10	4,30	5,70	7,68	9,48	11,30
22,8	0,06	0,50	1,06	1,88	2,86	3,70	4,86	6,02	7,44	9,02
20,9	0,04	0,44	1,00	11,30	2,06	2,60	3,50	4,30	5,30	6,30
19,1	0,02	0,36	0,70	0,92	1,50	1,90	2,30	2,80	3,40	4,00
17,3	0	0,34	0,62	0,84	1,22	1,60	1,88	2,14	2,50	2,80
15,5	0	0,30	0,54	0,74	0,90	0,96	1,04	1,20	1,38	1,42
ПРОРАЧУНАТО ПО МОДЕЛУ										
$y = a_1 \left(\frac{z}{250} \right)^2 = a_1 z_n^2 \qquad y = a_2 \left(\frac{z}{250} \right) + a_3 \left(\frac{z}{250} \right)^2 = a_2 z_n + a_3 z_n^2$										
Φ_1	Једначина еластичне линије		СКГ	$y'' \cdot 10^4$	Једначина еластичне линије		СКГ	$y'' \cdot 10^4$		
28,2	$y = 7,20 \cdot z_n^2$		0,20	2,30	$y = 0,80 \cdot z_n + 6,25 \cdot z_n^2$		0,025	2,00		
26,4	$y = 6,95 \cdot z_n^2$		0,15	2,22	$y = 0,68 \cdot z_n + 6,14 \cdot z_n^2$		0,040	1,96		
24,6	$y = 5,81 \cdot z_n$		0,08	1,86	$y = 0,36 \cdot z_n + 5,38 \cdot z_n^2$		0,024	1,72		
22,8	$y = 4,69 \cdot z_n$		0,21	1,50	$y = 0,86 \cdot z_n + 3,67 \cdot z_n^2$		0,036	1,17		
20,9	$y = 3,32 \cdot z_n^2$		0,20	1,06	$y = 0,78 \cdot z_n + 2,40 \cdot z_n^2$		0,021	0,77		
19,1	$y = 2,16 \cdot z_n^2$		0,23	0,69	$y = 0,81 \cdot z_n + 1,20 \cdot z_n^2$		0,005	0,38		
17,3	$y = 1,62 \cdot z_n^2$		0,23	0,52	$y = 0,94 \cdot z_n + 0,50 \cdot z_n^2$		0,034	0,16		
15,5	$y = 0,90 \cdot z_n^2$		0,24	0,29	$y = 0,93 \cdot z_n - 0,21 \cdot z_n^2$		0,022	-0,07		

Наставак табеле 3.7

УЗОРАК БРОЈ		Материјал		Φ_o	Φ_v	СМ		МЗ	БВ		
10		Č.4121		42	40	вучено		паста	7		
Помак →		25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
$\Phi_1 \downarrow$											
37,6		0,34	0,90	1,50	2,52	3,40	4,26	5,70	7,34	9,00	10,74
35,2		0,20	0,80	1,30	2,10	3,02	4,00	5,30	6,50	7,80	9,20
32,7		0,40	0,90	1,46	2,24	2,82	3,72	4,60	5,60	6,70	7,96
30,3		0,40	0,80	1,06	1,66	2,40	3,04	3,76	4,60	5,50	6,34
27,9		0,34	0,70	1,00	1,46	2,18	2,62	3,12	3,70	4,38	5,08
25,5		0,30	0,60	0,94	1,34	1,76	2,20	2,76	3,24	3,80	4,32
23		0,30	0,60	0,96	1,38	1,88	2,22	2,62	2,98	3,20	3,68
20,6		0,30	0,60	0,94	1,20	1,68	2,00	2,28	2,48	2,68	3,04
ПРОРАЧУНАТО ПО МОДЕЛУ											
$y = a_1 \left(\frac{z}{250} \right)^2 = a_1 z_n^2 \qquad y = a_2 \left(\frac{z}{250} \right) + a_3 \left(\frac{z}{250} \right)^2 = a_2 z_n + a_3 z_n^2$											
Φ_1	Једначина еластичне линије	СКГ	$y'' \cdot 10^4$	Једначина еластичне линије		СКГ	$y'' \cdot 10^4$				
37,6	$y = 5,62 \cdot z_n^2$	0,38	1,80	$y = 1,30 \cdot z_n + 4,07 \cdot z_n^2$		0,015	1,44				
35,2	$y = 4,92 \cdot z_n^2$	0,36	1,58	$y = 1,36 \cdot z_n + 3,30 \cdot z_n^2$		0,027	1,06				
32,7	$y = 4,30 \cdot z_n^2$	0,52	1,38	$y = 1,80 \cdot z_n + 2,15 \cdot z_n^2$		0,004	0,69				
30,3	$y = 3,49 \cdot z_n^2$	0,43	1,12	$y = 1,48 \cdot z_n + 1,72 \cdot z_n^2$		0,004	0,55				
27,9	$y = 2,84 \cdot z_n^2$	0,43	0,91	$y = 1,53 \cdot z_n + 1,00 \cdot z_n^2$		0,004	0,32				
25,5	$y = 2,44 \cdot z_n^2$	0,39	0,78	$y = 1,36 \cdot z_n + 0,82 \cdot z_n^2$		0,002	0,26				
23	$y = 2,18 \cdot z_n^2$	0,48	0,70	$y = 1,74 \cdot z_n + 0,11 \cdot z_n^2$		0,021	0,04				
20,6	$y = 1,85 \cdot z_n^2$	0,47	0,59	$y = 1,70 \cdot z_n - 0,18 \cdot z_n^2$		0,015	-0,06				



УЗОРАК - 10

$\Phi_v : 40 \text{ [mm]}$

$\Phi_1 : 30,3/20,6 \text{ [mm]}$

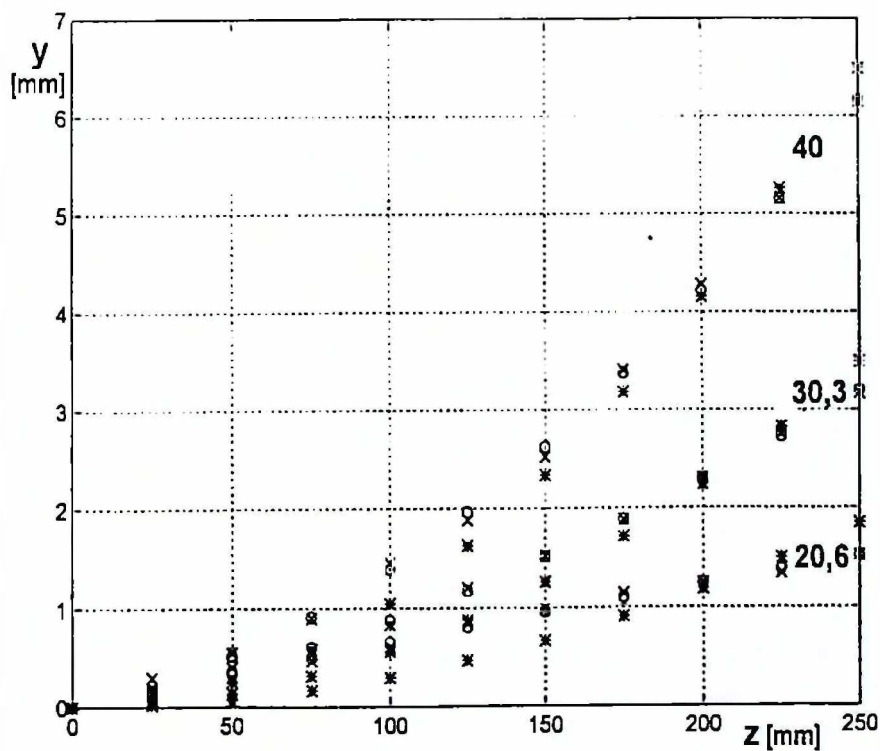
x - измерено

Моделі:

А - $y = a_1 \cdot z_n^2$

Б - $y = a_2 \cdot z_n + a_3 \cdot z_n^2$

Вредности a_1, a_2, a_3 су дате на слици 3.31



УЗОРАК - 10

$\Phi_v : 40 \text{ [mm]}$

$\Phi_1 : 30,3/20,6 \text{ [mm]}$

x - измерено

Моделі:

o - $y = a_1 \cdot z_n^2$

* - $y = a_2 \cdot z_n + a_3 \cdot z_n^2$

Вредности a_1, a_2, a_3 су дате на слици 3.31

Слика 3.30 - Упоређење експерименталних вредности за еластичну линију код узорка 10 после вучења, средњег и завршног стругања (вучени пречник 40 mm, редуковани пречници 30,30 и 20,6 mm) и прорачунатих по моделима А и Б (горе - модели са графицима; доле - кореспондентно са измереним вредностима)

3.6.3.3 Уопштавање модела еластичне линије за стање после редукције пречника стругањем

Коефицијенти моделних једначина А и Б дати у табели 3.7 мењају се у зависности од пречника шипке после машинске обраде стругањем. Ови резултати за узорак 10 су приказани на слици 3.31. Уочљиво је континуирано смањење коефицијената a_1 и a_3 , као и приближно константна вредност коефицијента a_2 у испитиваном интервалу полупречника. Избор једначина за апроксимацију ових зависности је извршен после провере полинома првог, другог и трећег степена. Тако је издвојена линеарна зависност приказана на слици 3.31 као задовољавајућа за a_1 и a_3 , док је коефицијент a_2 усвојен као константан. Наиме, са квадратним полиномом се у веома малој мери побољшава тачност апроксимације, а сваки полином вишег степена усложњава прорачун, у овом случају без позитивног ефекта на тачност апроксимације.

Праве $a_1=f(r)$ и $a_3=f(r)$ су практично паралелне, тј. са блиским вредностима нагиба и на међусобном растојању које одговара вредности коефицијента a_2 , у смислу претходне анализе. Тако се дошло до две уоштене једначине за опис зависности еластичне линије од z - помака и r - полупречника после редукције пресека стругањем, у облику:

$$\text{А} \quad : \quad y = (k_1 + k_2 \cdot r) \cdot z_n^2 ;$$

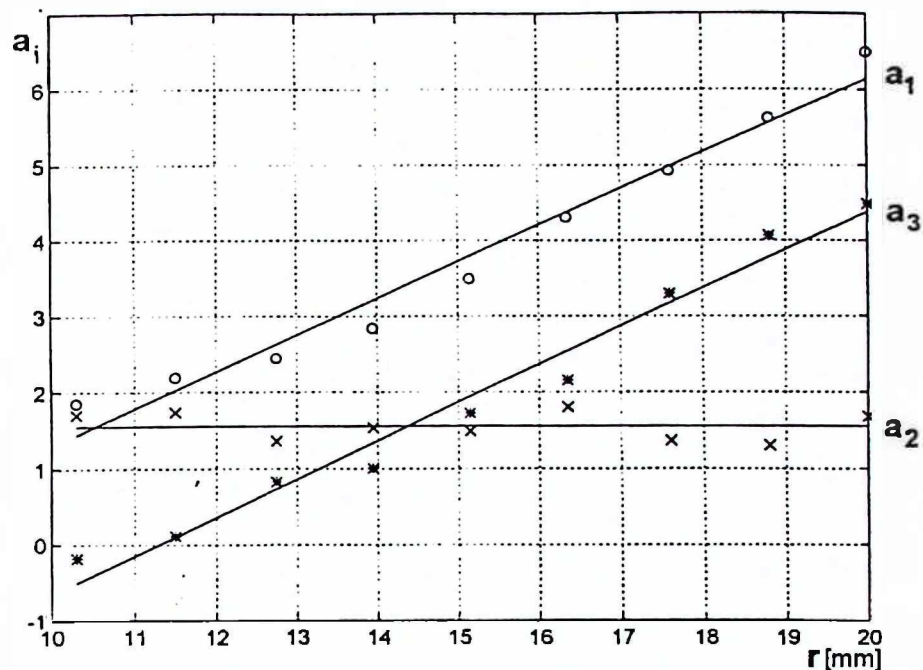
$$\text{Б} \quad : \quad y = a_2 r + (k_3 + k_4 \cdot r) \cdot z_n^2$$

Прорачун коефицијената k_1 ÷ k_4 је вршен као прорачун коефицијената осталих моделних једначина.

За оцену утицаја уопштавања модела за тачност прорачуна извршено је упоређење средњих квадратних грешака код примене појединачног модела Б ($y = y(z)$) и уоштеног модела Б ($y = y(z, r)$). Добијени резултати за узорак 10 дати су у табели 3.8. Уочава се да средња квадратна грешка код коришћења уопштеног модела Б ($y = y(z, r)$) има веће вредности у односу на појединачни модел Б ($y = y(z)$), али је и она у границама грешке апроксимације по једначини А ($y = y(z)$), што значи - толерантна.

Упоредни резултати измерених и прорачунатих вредности еластичне линије по уопштеним моделима А и Б за полазни средњи и најмањи редуктовани пречник код свих узорака приказани су на сликама 3.32, 3.33 и 3.34. Једначина по уопштеном моделу Б показује задовољавајуће поклапање код сва три узорка и сва три полупречника. Највеће одступање је код најмањег полупречника узорка 10 чија је средња квадратна грешка знатно већа од грешке код осталих пречника (табела 3.8). Прорачун по једначини уопштеног модела А ($y = y(z, r)$) изазива знатније одступање од измерених вредности, али и тада опстаје задовољавајући тренд експерименталних резултата. Осим тачности, разлике између уопштених модела А и Б су јасно изражене у облику дијаграма код пречника за које су вредности у блиске или једнаке нули. Наиме, код уопштеног модела А је $y = 0$ за $r = 4,33$ mm на комплетној дужини L - слика 3.35), док је за уопштени модел Б $y=0$ само на карактеристичном z - положају који зависи од полупречника (за $r = 4,5$ mm $y = 0$ на помаку $z = 225$ mm, слика 3.35).

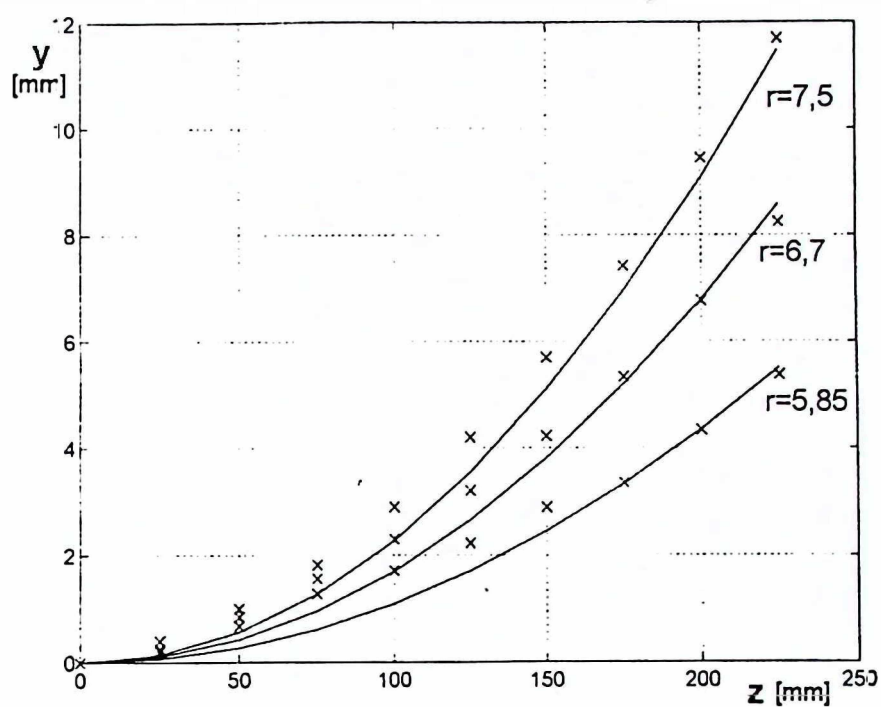
Анализа еластичне линије изван примењеног мерног подручја, која је приказана на слици 3.35, биће допуњена у тачки 3.6.4.6.



Слика 3.31 - Зависност a_1 , a_2 и a_3 од полупречника r код узорка 10 (тачке представљају вредности из табеле 3.7, а линије одговарајуће праве $a_1 = k_1 + k_2 r$; $a_2 = \text{const.}$; $a_3 = k_3 + k_4 r$)

Табела 3.8 Упоређење вредности средње квадратне грешке и другог извода еластичне линије при прорачуну по појединачном и уопштеном моделу Б код узорка 10

Полупреч r [mm]	ПОЈЕДИНАЧНИ МОДЕЛ		УОПШТЕНИ МОДЕЛ	
	СКГ	$y'' \cdot 10^4$	СКГ	$y'' \cdot 10^4$
20	0,026	1,44	0,376	1,40
18,8	0,015	1,30	0,071	1,21
17,6	0,027	1,06	0,201	1,02
16,35	0,004	0,70	0,039	0,81
15,15	0,004	0,55	0,385	0,62
13,95	0,004	0,32	0,436	0,43
12,75	0,002	0,26	0,226	0,23
11,5	0,021	0,04	0,313	0,03
10,3	0,015	-0,06	0,635	-0,16

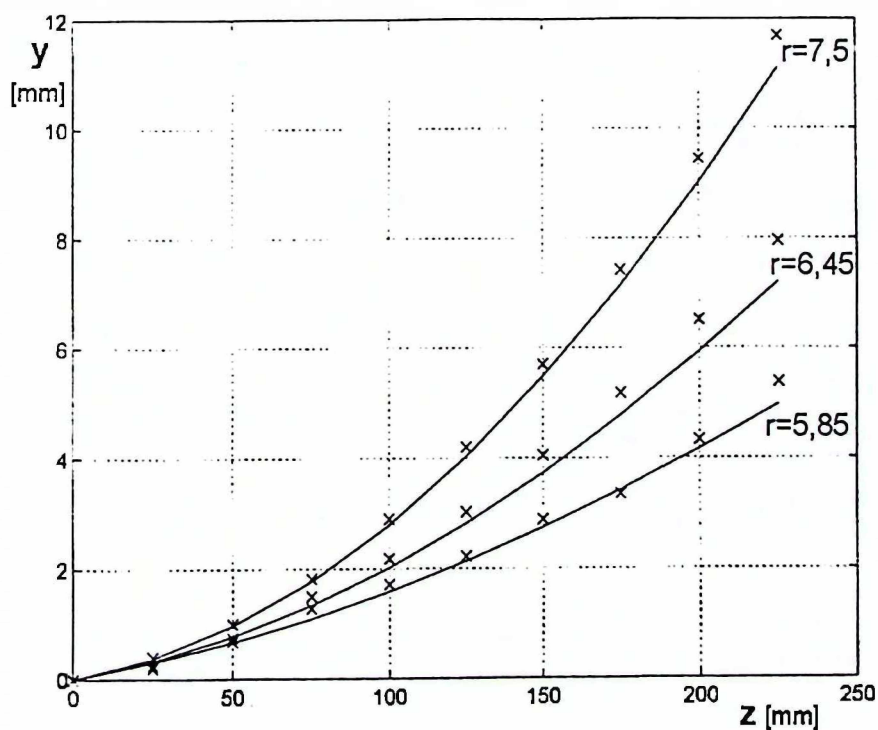


УЗОРАК - 1

x - измерено

Линија приказује
уопштени модел А:

$$y = (-19.36 + 4.47 \cdot r) \cdot z_n^2$$



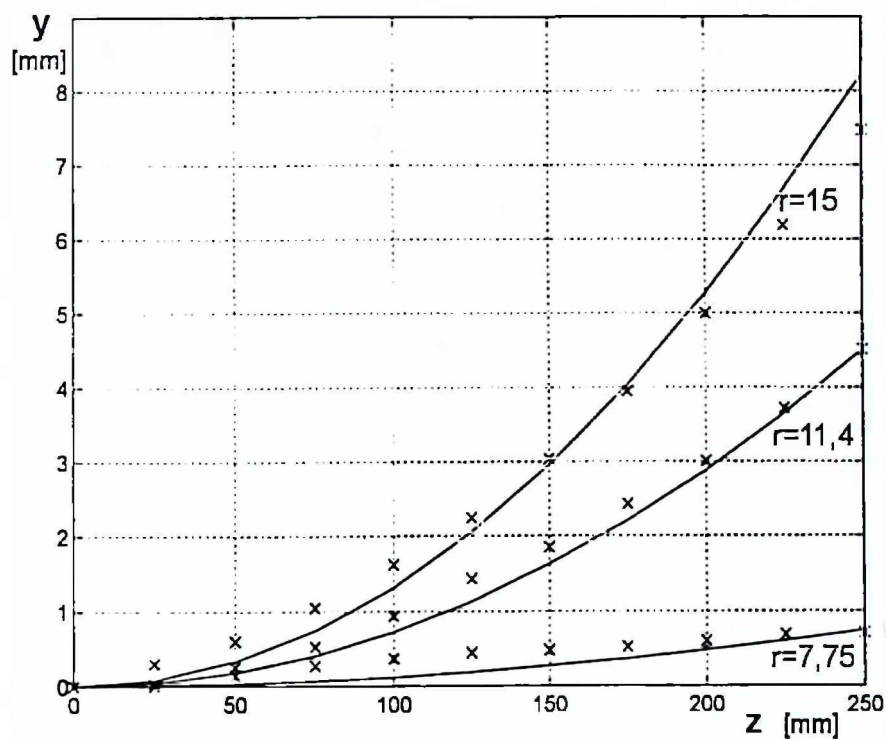
УЗОРАК - 1

x - измерено

Линија приказује
уопштени модел Б:

$$y = 2.67 \cdot z_n + (-23.70 + 4.59 \cdot r) \cdot z_n^2$$

Слика 3.32 - Упоређење експерименталних резултата и прорачунатих вредности по уопштеним моделима А и Б код узорка 1 за полазни, средњи и најмањи редуковани полупречник

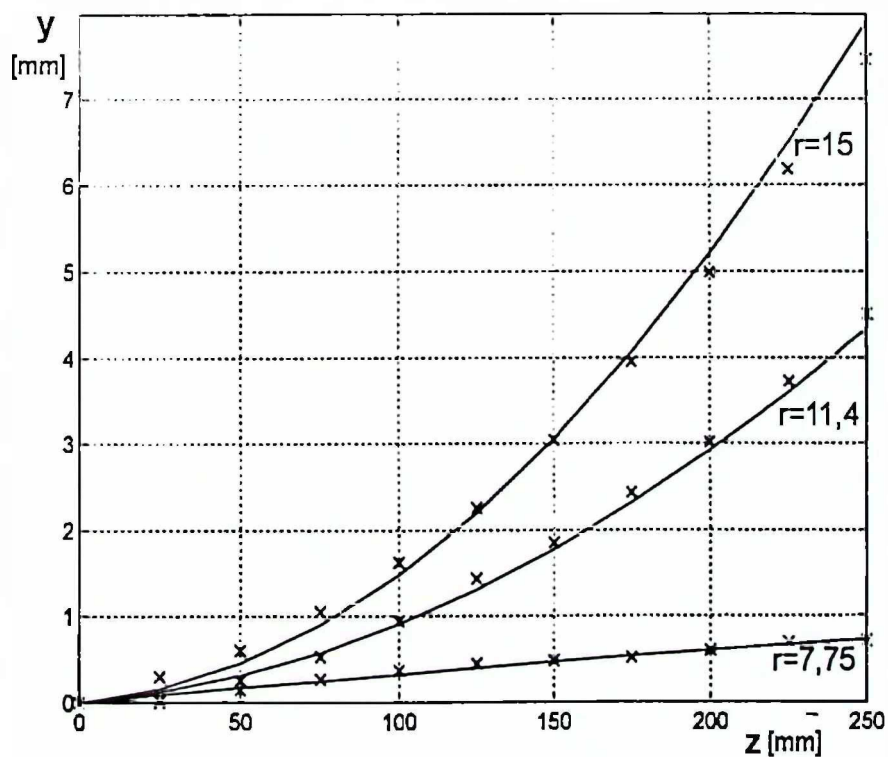


УЗОРАК - 9

x - измерено

Линија приказује
уопштени модел А:

$$y = (-7.25 + 1.03 \cdot r) \cdot z_n^2$$



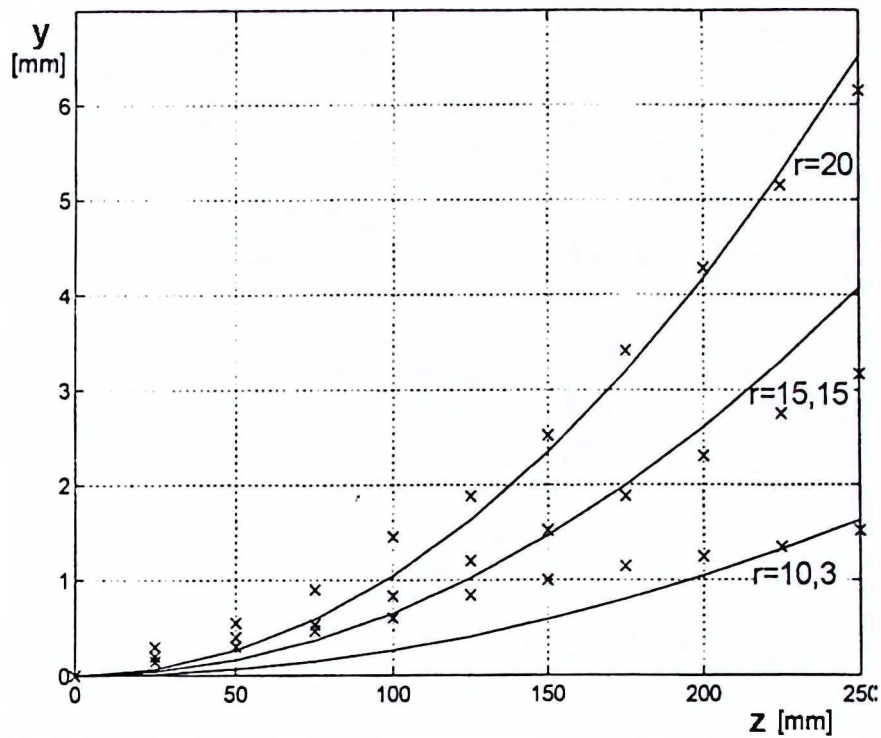
УЗОРАК - 9

x - измерено

Линија приказује
уопштени модел Б:

$$y = 0.87 \cdot z_n + (-7.83 + 0.99 \cdot r) \cdot z_n^2$$

Слика 3.33 - Упоређење експерименталних резултата и прорачунатих вредности по уопштеним моделима А и Б код узорка 9 за полазни, средњи и најмањи редуковани полупречник

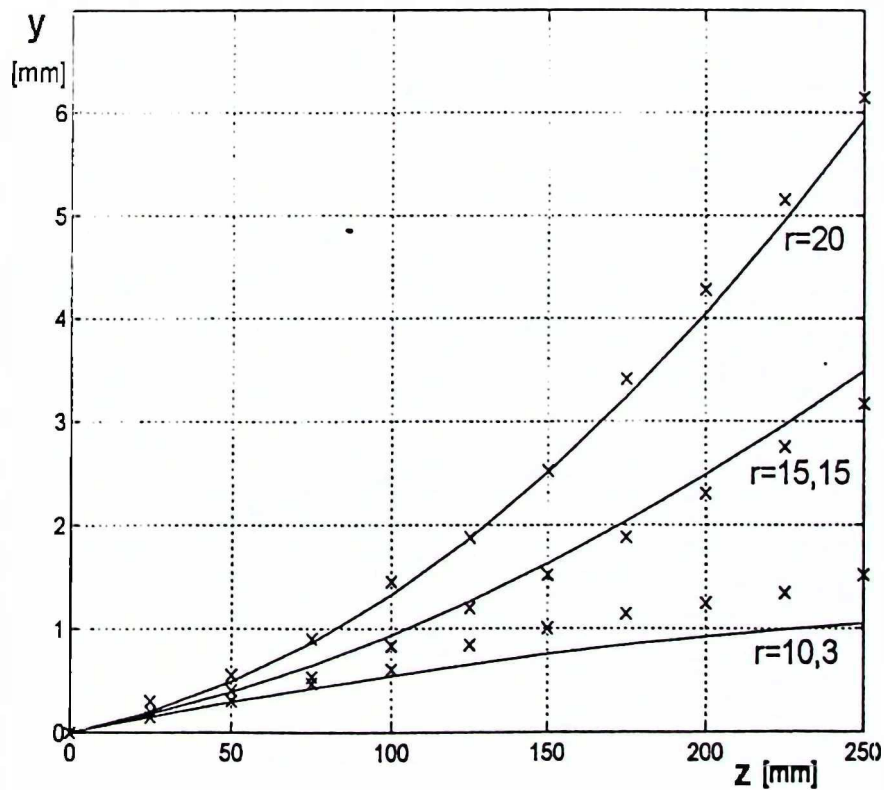


УЗОРАК - 10

x - појединачни модел

Линија приказује
уопштени модел А:

$$y = (3,56 + 0,49 \cdot r) \cdot z_n^2$$



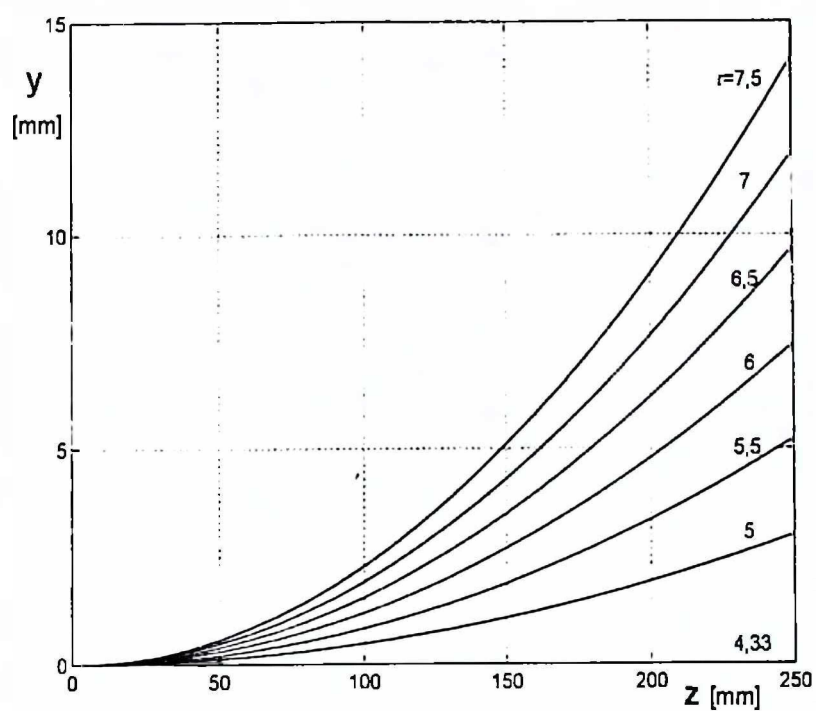
УЗОРАК - 10

x - појединачни модел

Линија приказује
уопштени модел Б:

$$y = 1,55 \cdot z_n + (-5,69 + 0,50 \cdot r) \cdot z_n^2$$

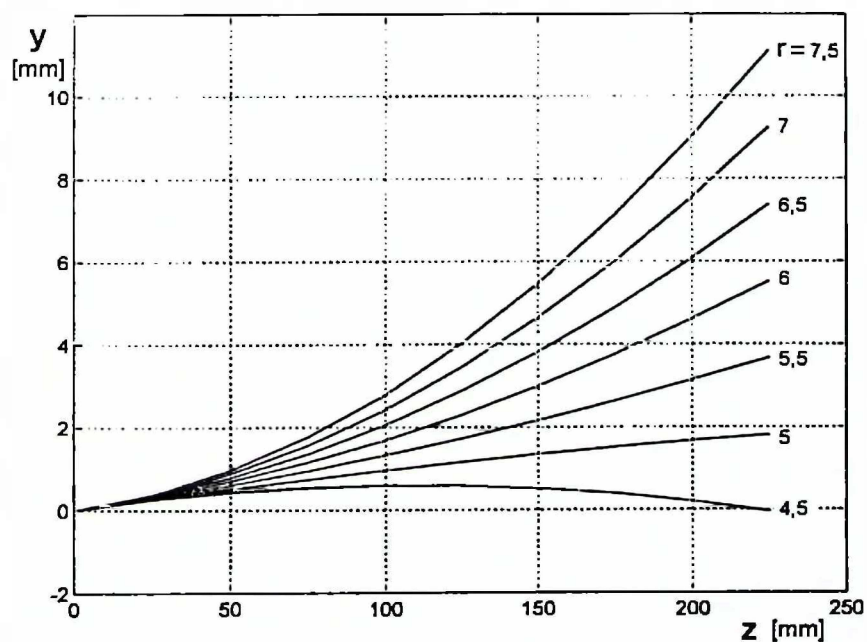
Слика 3.34 - Упоређење експерименталних резултата и прорачунатих вредности по уопштеним моделима А и Б код узорка 10 за полазни, средњи и најмањи редуковани полупречник



УЗОРАК - 1

Уопштени модел А:

$$y = (-19,36 + 4,47 \cdot r) \cdot z_n^2$$



УЗОРАК - 1

Уопштени модел Б :

$$y = 2,67 \cdot z_n + (-23,70 + 4,59 \cdot r) \cdot z_n^2$$

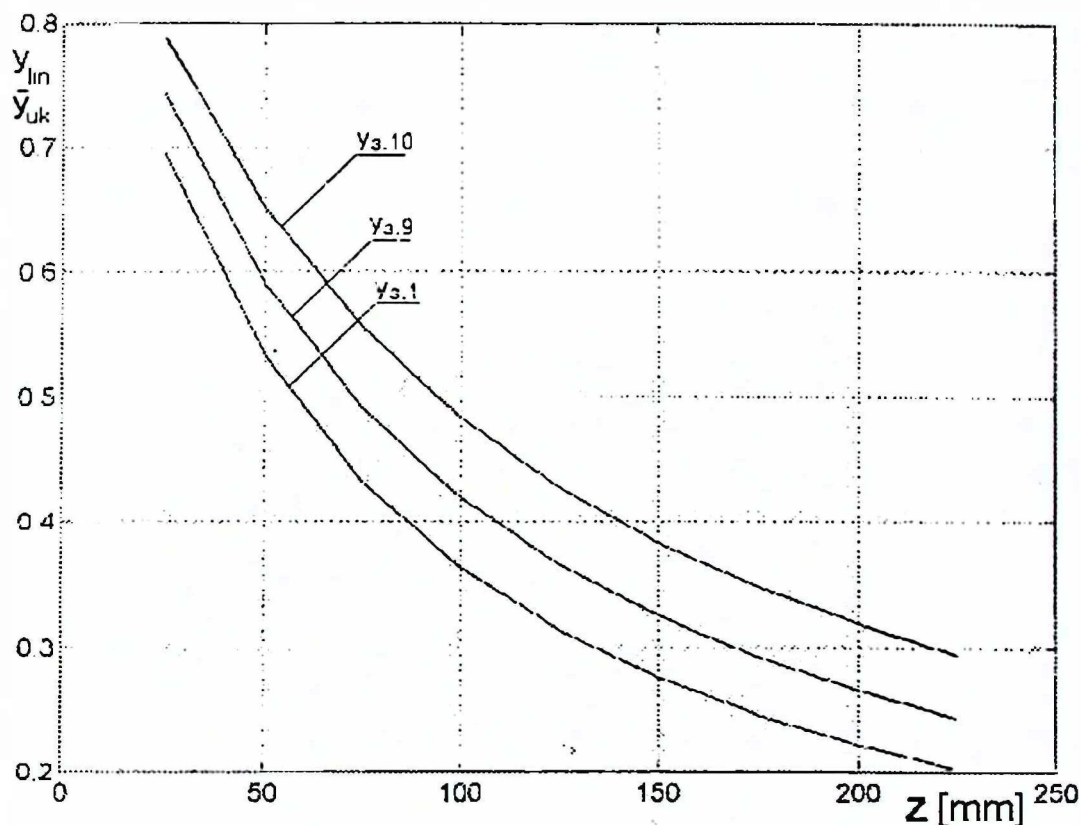
Слика 3.35 - Еластичне линије (у области позитивних вредности) код узорка 1 прорачунате по уопштеним моделним једначинама А и Б

3.6.4 Аксијални заостали напони

3.6.4.1 Равнотежно стање настало при дифлекцији и извођење једначина за прорачун напона

Моментно оптерећење, након раздвајања заковичног споја, изазива еластично савијање раздвојених половина узорка. Пошто су вредности напона константне по дужини узорка, то је и момент савијања после нарушавања њихове равнотеже константан по дужини.

Еластична линија се може са задовољавајућом тачношћу описати по једначини Б. Удео линеарног члана у еластичном угибу креће се у границама од 0,7 - 0,8 (у близини нераскинутог споја) до 0,2 - 0,3 (у близини раскинуте везе). Наглашени интервал зависи од пречника, као што је приказано на слици 3.36.



Слика 3.36 - Промена односа y_{lin}/y_{uk} дуж отвора за узорке различитог полупречника

Уопштена релација за савијање штапа са константним моментом оптерећењем гласи:

$$E \cdot I_x \cdot \frac{1}{\rho} = |M_s|$$

где су: E - модул еластичности штапа [МПа] ;

I_x - момент инерције за осу око које се врши савијање [м⁴];

ρ - полупречник кривине еластичне линије [m].

Ако је $M_s = \text{const.}$ на целој дужини шипке, као и уз реалан услов да је нагиб еластичне линије знатно мањи од јединице, добија се:

$$M_s = \frac{2EI_x f}{L^2},$$

где је f - вредност еластичног угиба на крају шипке (на дужини L од укљештења).

Да би се услови савијања разрезаног штапа (шипке) повезали са заосталим напонима, неопходно је издвојити релације за моментно оптерећење настало при нарушавању равнотеже унутрашњих напона. При томе се мора имати у виду просторна уравнотеженост напона, која се, уз услов константности по дужини (z -координата) и осносиметричности (θ -координата), преводи на зависност од r -координате. Осносиметричност даље поједностављује просторну функцију заосталих напона и омогућује превођење на спољашња моментна оптерећења, услед резултујућег спрега концентрисаних сила или резултујућег момента из моментног оптерећења у јединичном елементу, слика 3.37.

На основу једнакости момента савијања и момента заосталих напона добијају се изрази за заостали напон. У случају линеарне расподеле заосталих напона по r -координати неутрална линија се налази на $2/3 R_0$, па је према слици 3.37(a):

$$F = \frac{4}{27} \pi R_0^2 \sigma_p \quad l = \frac{8}{9\pi} R \quad M_s = \frac{2}{12} R_0^3 \sigma_p = \frac{2EI f}{L^2}$$

односно:

$$\sigma_p = 12 \left(\frac{\pi}{8} - \frac{8}{9\pi} \right) \frac{R_0 E f}{L^2},$$

где је σ_p - заостали напон на површини на основу еквивалентног оптерећења и линеарне дистрибуције по попречном пресеку.

За случај на слици 3.37 (б) је:

$$m = \frac{3 \sigma_p I_{K1}}{2 R_0}$$

где је I_{K1} - момент инерције кружног исечка $R_0 d\phi$, одакле се добија идентичан израз за изведени напон σ_p .

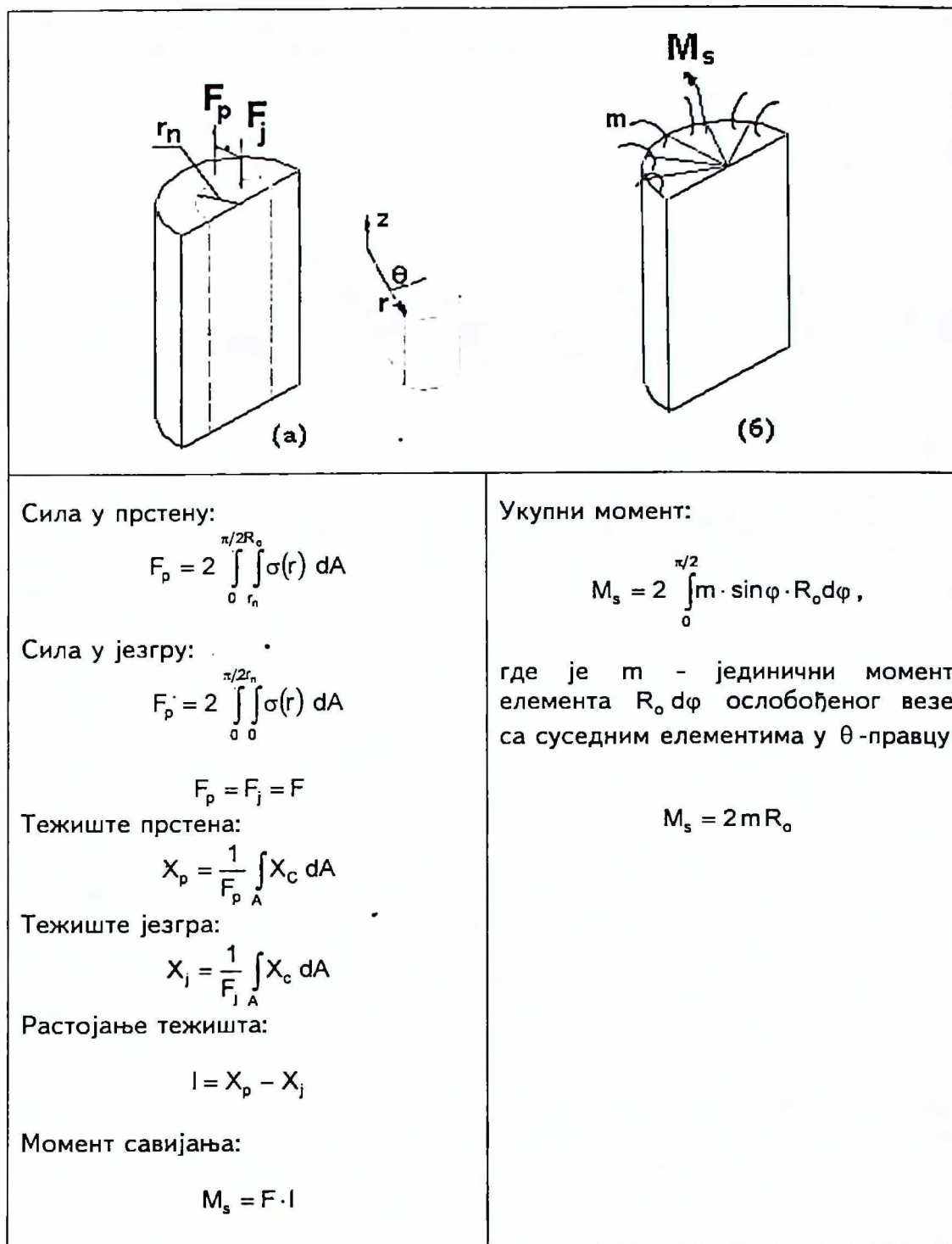
Линеарни модел расподеле $\sigma_z(r)$, који је усвојен при извођењу израза за σ_p , одређује напон у свакој тачки r - физичке области штапа (шипке). Коефицијенти у линеарном моделу се добијају на основу уравнотежености по комплетној запремини половине штапа. У том смислу се може издвојити као прихватљиво опште решење - непотпуна парабола n -тог реда која има облик:

$$\sigma_z = \sigma_p (C r_N^n + B)$$

где су: σ_z - аксијална компонента заосталих напона; [MPa]

σ_p - аксијална компонента заосталих напона на површини; [MPa]

$r_N = r/R_0$ - релативни полупречник.



Слика 3.37 - Шема превођења дејства заосталих напона на еквивалентна спољашња оптерећења: (а) - за ослобађање везе као у експерименту; (б) - за потпуно уклањање заосталих напона

Тако је на омотачу: $r_N = 1$, $\sigma_z = \sigma_p$, $C + D = 1$; а услов уравнотежења по укупној

запремини: $\int_0^{\pi} \int_0^1 \sigma_p (C r_N + D) r_N dr_N d\varphi = 0.$

Уопштена решења за коефицијенте омогућавају да се формира једначина - уопштени модел дистрибуције аксијалних заосталих напона по пресеку штапа:

$$\sigma_z = \sigma_p \left[\left(1 + \frac{2}{n} \right) \cdot r_N^n - \frac{2}{n} \right]$$

где је n - ред параболе.

Очигледно је да је коефицијент C по апсолутној вредности за 1 већи од коефицијента D и супротног знака. Карактеристична решења услова који важе за заостале напоне до параболе четвртог реда су дати у табели 3.9.

Издвојени подаци показују да се при истој вредности напона σ_p изразито мења напон на оси и то од $-2\sigma_p$ (код линеарне) до $-1/2\sigma_p$ (код параболе четвртог реда). Промена вредности резултантне силе је одређена коефицијентом 0,465 (код линеарне) и 0,302 (код највећег издвојеног степена), што значи да се иста смањи 1,54 пута. Крак силе се, такође, смањује, што показује његова вредност исказана у односу на релативни полупречник - од 0,358 (код првог степена) до 0,315 (код четвртог степена). Оба ова фактора се множе у вредности момента, тако да се он смањује за 1,75 пута.

Ако се фиксира момент савијања (усвоји да је константан), онда се његова вредност у зависности од степена параболе мења по једначини:

$$M_s = \frac{2}{3 \cdot (3+n)} R_o^3 \sigma_p,$$

услед чега се мења заостали напон на површини и има облик:

$$\sigma_p = \frac{9\pi^2 - 64}{24\pi} \cdot (3+n) \cdot R_o \cdot E \cdot \frac{f}{L^2}$$

Ова једначина показује да се, за услов константног момента, напон на површини повећава за 25% при повећању степена параболе n од линеарне до квадратне, а да се при сваком већем реду параболе напон на површини повећава за исти износ.

3.6.4.2 Вредности аксијалних заосталих напона код вучених шипки

Напони на површини штапа, прорачунути по једначини са линеарним моделом расподеле за узорак 1, приказани су у зависности од z -положаја дуж еластичне линије на слици 3.38. Ефекат код линије еластичног угиба изазван високим уделом линеарног члана условиле су високе вредности заосталих напона у близини заковичног споја, односно њихово смањење сагласно смањењу линеарног члана. Напони за појединачни модел А (чисто моментно савијање конзоле) су константни по читавој дужини отварања узорка. Такође је евидентно да се на крају отвора напони изједначају и достижу вредности 435,8÷452,5 МПа. У случају да модел дистрибуције по попречном пресеку одговара степеним

функцијама, напони се повећавају за исти износ при сваком вишем степену. Ови резултати су приказани у табели 3.10.

Расипање прорачунатих вредности настаје као последица грешке мерења еластичног угиба, односно грешке апроксимације еластичне линије. Ако се расипање дефинише са позитивном и негативном средњом квадратном грешком око измерене, односно прорачунате вредности еластичне линије, вредности напона на површини код узорка 1 се налазе у областима приказаним на слици 3.39. Илустративно је да грешка апроксимације еластичне линије по моделу Б формира практично занемарљиву област расипања напона по дужини отвора, што потврђује високу поузданост добијених резултата. Треба истаћи да је грешка апроксимације еластичне линије по моделу А већа, па је према наведеном и област расипања прорачунатих напона знатна. Међутим, мора се имати у виду да је та област променљива по читавој дужини еластичне линије, да би код појединачних резултата на крају штапа била практично сведена на грешку мерења. То допунски потврђује поузданост добијених вредности, али и примењивост методе у случајевима где постоји довољно велики однос дужине узорка према пречнику. Према овде добијеним резултатима тај однос је следећи:

$$\frac{L}{R_0} \geq 12 \quad \text{за узорке пречника око 15 mm ;}$$

$$\frac{L}{R_0} \geq 10 \quad \text{за узорке пречника око 30 и 40 mm .}$$

Применом ових критеријума су, у првом случају, напони прорачунати за вредност угиба на помаку $z = 200$ mm, односно на помаку $z = 225$ mm, у другом случају.

У једначини за прорачун напона на површини садржан је и модел дистрибуције напона. Опредељење за константни момент савијања изазива промене напона на површини и његову зависност од степена једначине расподеле напона. Међутим, коначан избор неке од њих ће се извршити након завршетка анализе и осталих резултата. Пошто је пречник добијен након калибрационог вучења, то је његова тачност висока по читавој дужини вучене шипке, односно грешка која је могућа, је знатно мања од грешке мерења еластичне линије. Тачност одређивања модула еластичности и дужине отвора (помака) су, такође, довољно велики тако да је најзначајнији извор грешке у прорачуну напона грешка мерења еластичне линије, односно тачност прорачуна по моделним једначинама.

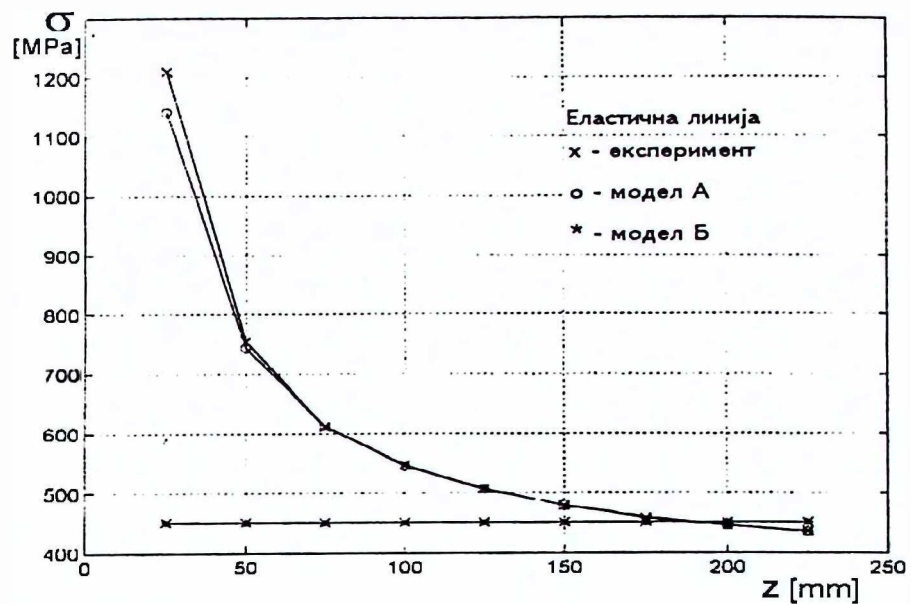
Као потпуно поуздан модел апроксимације резултата за еластичну линију, модел Б је коришћен у свим случајевима накнадне математичке обраде и моделирања експерименталних резултата. При прорачуну вредности напона по овом моделу коришћена је она бројна вредност угиба која се од експерименталних резултата, односно моделне једначине А разликује за вредност грешке мерења. Из тог разлога, без обзира на полазне разлике које су неминовне при појави линеарног члана са квадратним, а које произлазе и из једначине $1/\rho = y''/(\sqrt{1+y'})^3$, оне нису узимане у обзир, већ је једначина за σ_r служила за дефинисање оних моделних вредности који се поклапају са експерименталним резултатима.

Коначно се може навести да су аксијални заостали напони за дати програм испитивања између 300 и 670 МПа за претпостављени линеарни модел расподеле, односно увећани до 1,75 пута за параболу четвртог реда.

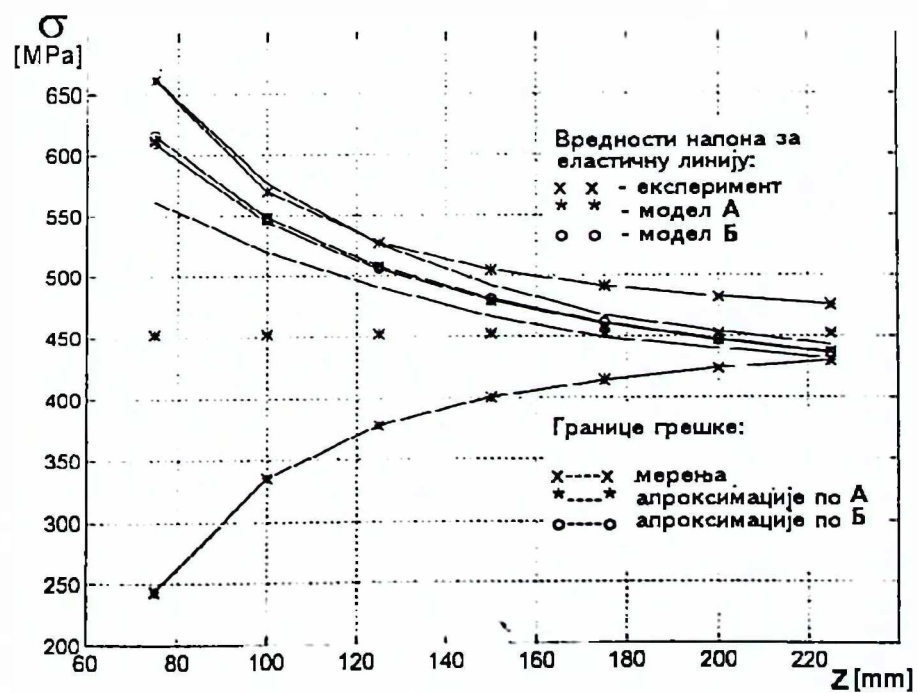
Табела 3.9 Распoдела аксијалних напона по попречном пресеку и резултујућа моментна оптерећења при раздвајању узорака

Ред параболе	ЗАВИСНОСТ	Напон на површини	Напон у оси	НЕУТРАЛНА ЛИНИЈА
n	$\sigma = f(\sigma_p, r_N) \quad r_N = \frac{r}{R}$	σ_p	σ_o	r за $\sigma = 0$
1	$\sigma = \sigma_p(3r_N - 2)$	σ_p	$-2\sigma_p$	$\frac{2}{3}R_o = 0,667 \cdot R_o$
2	$\sigma = \sigma_p(3r_N^2 - 2)$	σ_p	$-\sigma_p$	$\frac{\sqrt{2}}{2}R_o = 0,707 \cdot R_o$
3	$\sigma = \sigma_p\left(\frac{5}{3}r_N^3 - \frac{2}{3}\right)$	σ_p	$-\frac{2}{3}\sigma_p$	$\left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot R_o = 0,737 \cdot R_o$
4	$\sigma = \sigma_p\left(\frac{3}{2}r_N^4 - \frac{1}{2}\right)$	σ_p	$-\frac{1}{2}\sigma_p$	$\left(\frac{1}{3}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot R_o = 0,760 \cdot R_o$

Ред параболе	РЕЗУЛТУЈУЋЕ СИЛЕ	КРАК СИЛА	МОМЕНТ СИЛА
n	$F = F_p = F_j$	l	$M = Fl$
1	$\frac{4}{27} \pi R_o^2 \sigma_p = 0,465 R_o^2 \sigma_p$	$\frac{9}{8\pi} R_o = 0,358 R_o$	$\frac{2}{12} R_o^3 \sigma_p = 0,166 R_o^3 \sigma_p$
2	$\frac{1}{8} \pi R_o^2 \sigma_p = 0,393 R_o^2 \sigma_p$	$\frac{16}{15\pi} R_o = 0,340 R_o$	$\frac{2}{15} R_o^3 \sigma_p = 0,134 R_o^3 \sigma_p$
3	$\frac{1}{5} \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{2}{3}} \pi R_o^2 \sigma_p = 0,342 R_o^2 \sigma_p$	$\frac{4}{9} \left(\frac{2}{5}\right)^{-\frac{2}{3}} \frac{R_o}{\pi} = 0,358 R_o$	$\frac{2}{18} R_o^3 \sigma_p = 0,111 R_o^3 \sigma_p$
4	$\frac{\sqrt{3}}{18} \pi R_o^2 \sigma_p = 0,302 R_o^2 \sigma_p$	$\frac{4\sqrt{3}}{7\pi} R_o = 0,315 R_o$	$\frac{2}{21} R_o^3 \sigma_p = 0,095 R_o^3 \sigma_p$



Слика 3.38 - Прорачунате вредности напона на површини за узорак 1 дуж еластичне линије



Слика 3.39 - Грешке мерења и прорачуна напона на површини са границама грешке за узорак 1

Табела 3.10 Вредности заосталих напона на површини узорка за помак $z = 225\text{ mm}$ и четири претпостављене расподеле напона по попречном пресеку

УЗОРАК	Једначина еластичне линије	НАПОНИ НА ПОВРШИНИ за $z=225\text{ mm}$, [MPa]			
		линеарна расподела	квадратна расподела	трећег степена	четвртог степена
2 вучено	Експеримент	432,8	541,1	649,3	757,5
	Модел А	432,6	540,8	648,9	757,1
	Модел Б	432,1	540,1	648,2	756,2
2 жарено	Експеримент	276,0	345,4	413,5	483,6
	Модел А	277,1	347,4	416,7	486,4
	Модел Б	273,9	342,7	412,4	481,1
3 вучено	Експеримент	338,1	422,6	507,1	591,7
	Модел А	338,7	423,3	507,9	592,6
	Модел Б	337,6	422,0	506,4	590,4
4 вучено	Експеримент	307,8	384,7	461,7	538,6
	Модел А	308,8	386,1	463,3	540,5
	Модел Б	308,1	385,1	462,2	539,2
5 вучено	Експеримент	663,4	829,3	995,2	1161
	Модел А	673,9	842,4	1010,9	1179,4
	Модел Б	665,3	831,7	998,0	1164,3
6 вучено	Експеримент	465,0	581,3	697,5	813,8
	Модел А	467,8	584,8	701,7	818,7
	Модел Б	460,6	575,8	690,9	806,1
6 жарено	Експеримент	343,2	429,0	514,8	600,6
	Модел А	348,7	435,8	523,0	610,2
	Модел Б	344,0	430,0	516,0	602,0
7 вучено	Експеримент	564,4	705	846,5	987,6
	Модел А	571,1	713,9	856,7	999,5
	Модел Б	523,9	654,9	785,9	916,9

Наставак табеле 3.10

УЗОРАК	Једначина еластичне линије	НАПОНИ НА ПОВРШИНИ за $z=225\text{ mm}$, [МПа]			
		линеарна расподела	квадратна расподела	трећег степена	четвртог степена
8 вучено	Експеримент	450,9	563,6	676,3	789,0
	Модел А	458,9	573,6	688,3	803,0
	Модел Б	450,0	562,5	675,0	787,5
9 вучено	Експеримент	508,6	635,8	762,9	890,1
	Модел А	516,9	646,1	775,3	904,6
	Модел Б	507,8	634,7	761,6	888,6
10 вучено	Експеримент	573,5	716,8	860,2	1003,5
	Модел А	585,5	731,9	878,3	1024,7
	Модел Б	573,0	716,3	859,5	1002,8
11 вучено	Експеримент	585,7	732,1	878,6	1025,0
	Модел А	598,7	748,3	897,9	1047,6
	Модел Б	582,8	728,5	874,2	1019,9
11 жарено	Експеримент	484,4	605,5	726,6	847,7
	Модел А	500,3	625,4	750,4	875,5
	Модел Б	486,3	607,9	729,5	851,1

3.6.4.3 Утицај параметара вучења на вредност аксијалних заосталих напона

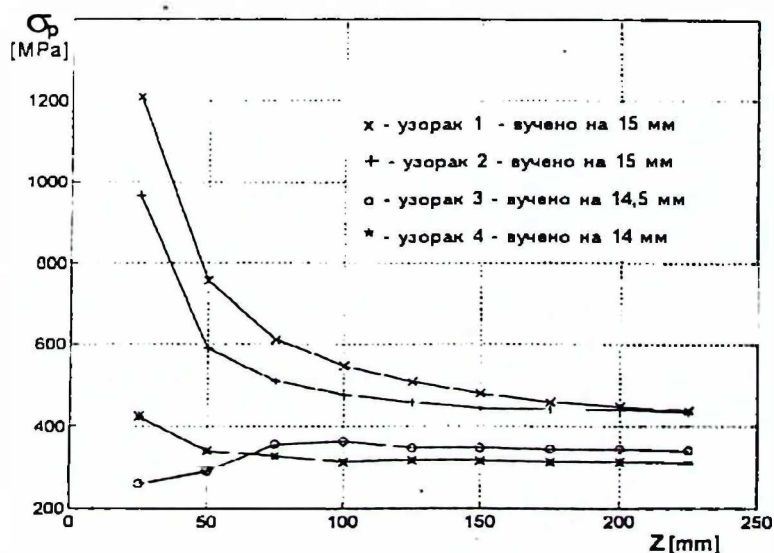
Утицај редукције пресека

Резултати на узорцима 1 и 2 се односе на идентичне услове вучења. Разлике вредности су у границама грешке мерења. Узорци 3 и 4 су вучени са степеном редукције пресека од 0,2 и 0,27, тако да заједно са степеном редукције од 0,13 код узорка 1 и 2 покривају област уобичајених степена редукције код вучених шипки. Повећавање вредности степена редукције изазива уочљиво смањење вредности заосталих напона са $\approx 440\text{ МПа}$ на $\approx 300\text{ МПа}$. Укупни ефекат дуж еластичне линије је приказан на слици 3.40, за вредности напона прорачунате на основу експерименталних вредности еластичне линије. Очигледно је да се коначни ефекат утицаја редукције на заостали напон формира већ на растојању непосредно иза заковичног споја. Повећање редукција, осим наведеног, показује јасан утицај на уклањање ефекта заковичног споја, односно линеарног члана у једначини еластичне линије. Смањење заосталих напона са повећањем редукције је

у складу са променом деформација у процесу вучења датој у претходним поглављима. Такође, резултати дати у радовима [19,65,66,67,68] анализирају значај повећања редукције за регулисање заосталих напона ради развоја савремених вучних постројења. Стабилизовање услова вучења код повећања редукције је резултирало и елиминисањем утицаја споја тако да се услови приближавају чистом конзолном савијању са константним моментом.

Утицај пречника

Подаци у табели 3.10, као и на слици 3.41 показују да су заостали напони код узорка са пречником 30 и 40 mm повећани у односу на вредности код узорка са пречником 15 mm и мањим. Међутим, повећање пречника је праћено у конкретном случају и повећањем модула еластичности тако да је сам утицај пречника знатно мањи у релативном износу. Тако је код узорка 1 и код узорка 8, након елиминисања утицаја модула еластичности, добијена веома мала разлика заосталих напона. Слично је и код узорка 6 и 9. Међутим, резултати код узорка 5 и 7 са пречником 30 mm су знатно већи од осталих за пречнике 15 и 40 mm. Ако се ови резултати упореде са резултатима за исти материјал код пречника 15 mm и два узорка са највећим пречником, онда је јасно да су ове вредности знатно повећане, чак и након елиминисања утицаја модула еластичности. Разлог за овакве вредности су несиметричност захвата при вучењу који изазива поремећај равнотеже течења у зони деформације. Несиметричност се задржава по читавој дужини вучене шипке уколико се не коригује на улазу у матрицу.



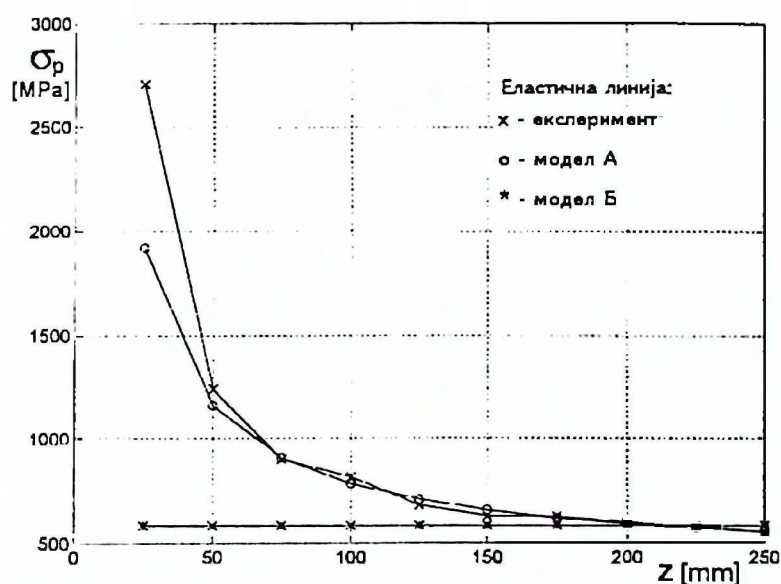
Слика 3.40 - Заостали напони на површини узорка за различите редукције пресека

Повећање пречника има много већи ефекат у близини заковичног споја што показују дијаграми на слици 3.36 о утицају пречника на удео линеарног члана у моделној једначини еластичне линије, односно бројне вредности напона на дијаграмима, слика 3.38. Коначне вредности напона су 446,7 до 307,8 МПа, код пречника 15; 14,5 и 14 mm, односно од 465 до 564,4 МПа, код пречника од 30 mm (без узорка 5 и 7), и 585 МПа код пречника 40 mm.

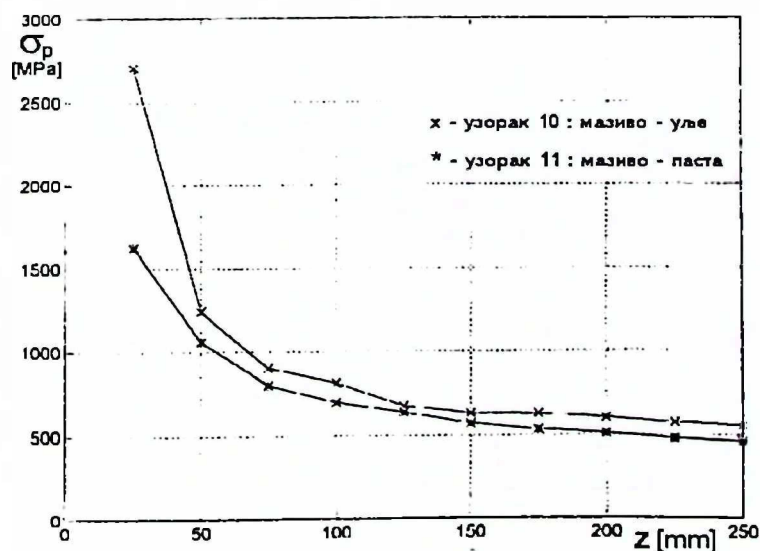
Утицај осталих фактора

На основу релаизованих експеримената може се још издвојити утицај мазива на вредност заосталих напона. Ако се утицај средства за подмазивање разматра на основу вучне силе као релевантног фактора за повољне услове за одвијање процеса, онда се такви повољни услови одражавају и на смањење вредности заосталих напона. Јасно је да повољни услови трења на контактної површини изазивају ниже вредности силе трења и ниже вредности силе вучења. Дијаграми на слици 3.42 за вучене шипке пречника 40 mm од челика $\check{C}.4121$ ово поуздано показују са континуалном разликом дуж целе еластичне линије. (разлике код узорака 1 и 2 за исте услове вучења се смањују и на крају практично елиминишу). Коначне вредности напона су различите и код узорака 5 и 7, односно 6 и 9. У свим случајевима оне се крећу до 10 %.

Утицај хемијског састава је упоредив код узорака 8 и 9. Међутим, коначне вредности су прорачунате са различитим модулом еластичности тако да је, уз анализиране грешке, овај утицај тешко поуздано евидентирати. За очекивати је да је хемијски састав доминантан утицајни фактор на модул еластичности.



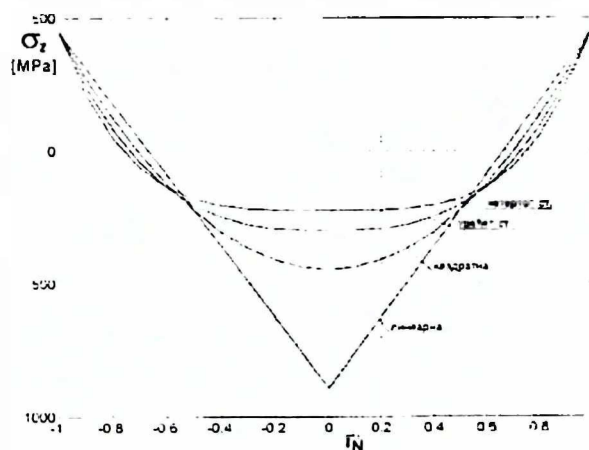
Слика 3.41 - Заостали напони на површини за узорак 10



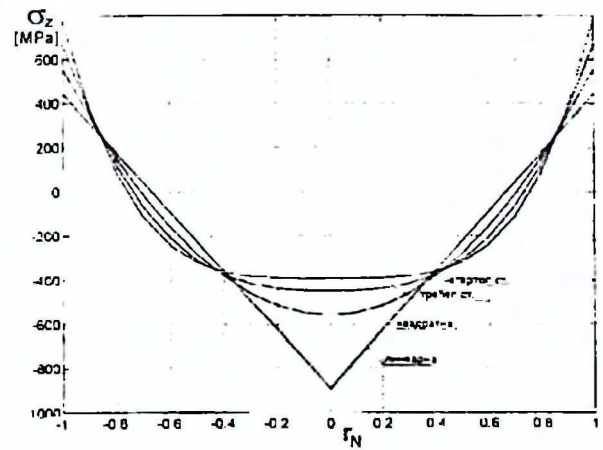
Слика 3.42 - Утицај мазива на заостале напоне на примеру узорака 10 и 11

3.6.4.4 Дистрибуција напона по попречном пресеку

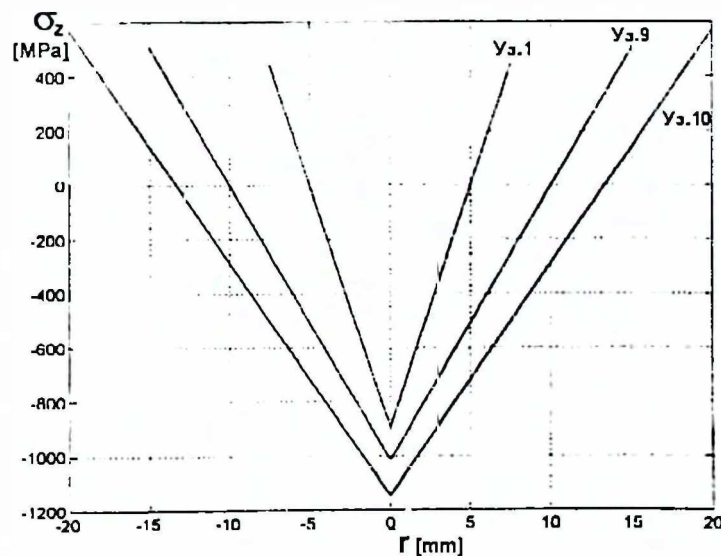
Резултати за аксијалне заостале напоне прорачунати по једначинама из табеле 3.9, код узорка 1 су графички приказани на сликама 3.43 и 3.44. У првом случају ради се о дистрибуцији при константном напону на површини ($\sigma_p = \text{const.}$), а у другом - при константном моменту савијања ($M_s = \text{const.}$). Уопштено, напони се могу поделити на две зоне, и то: зону притисних напона и зону затезних напона. Разлике између модела дистрибуције при $\sigma_p = \text{const.}$ су знатне у области притисних напона и то тако да почињу од $r \approx 0,5R_0$ и расту достижући највеће вредности на самој оси. Према подацима из табеле 3.9 вредности σ_p се разликују и до четири пута. Од издвојених r - положаја до површине заостали напони се мењају, тако да код линеарне дистрибуције имају највеће вредности. У овој области разлике се поново повећавају до четири пута на $r \approx 0,8R_0$, а затим се смањују и нестају на површини. Овакав ток условљава и различите положаје неутралног пречника који су већ наведени у табели 3.9.



Слика 3.43 - Дистрибуција ЗН за $\sigma_p = \text{const.}$



Слика 3.49 - Дистрибуција ЗН за $M_s = \text{const.}$



Слика 3.45 - Линеарна дистрибуција ЗН по пресеку за узорке 1, 9 и 10

Уравнотеженост при $M_s = \text{const.}$ мења разлике анализиране за $\sigma_p = \text{const.}$ по два основа, и то: смањују се највеће разлике на 1,75 пута и мења се положај издвојених карактеристичних r -координата. Осим наведеног, два пута се изједначавају вредности по свим дистрибуцијама. Промена карактеристичних r -положаја је таква да се оне померају ка нижим вредностима, тј. друга тачка једнаких вредности напона се помера са површине у унутрашњост узорка (на приближно $r \approx 0,84 R_o$). Разлике од овог положаја до површине ($r = R_o$) се веома интензивно повећавају, што је већ раније анализирано. Обзиром да је у једначинама као променљива издвојен релативни полупречник ($r_N = r/R_o$), произлази да ће карактеристичне дистрибуције бити идентичне код свих узорака. То је илустровано на дијаграму, слика 3.45, на којем су упоредно приказани резултати за узорак 1, 9 и 10. Разлике вредности σ_p код ових узорака су идентификоване као утицај пречника вучене шипке.

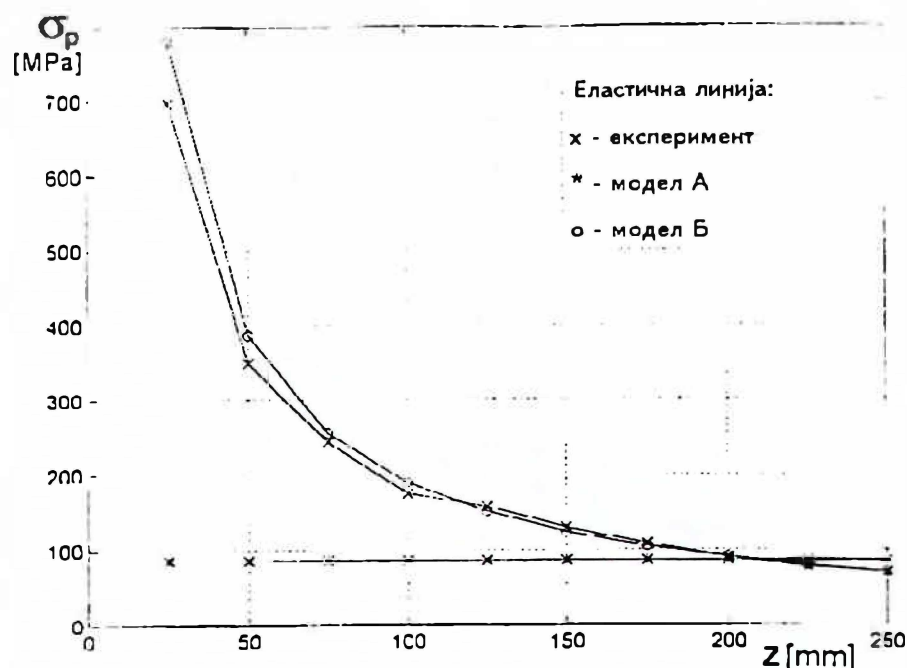
3.6.4.5 Редистрибуција заосталих напона

Дистрибуција напона по попречном пресеку има следеће битне карактеристике: вредност моментног оптерећења, вредност напона на површини и брзину промене напона по пресеку. Свакако да код прогнозирање критичног ефекта утицаја заосталих напона треба изабрати најнеповољнији случај - линеарну расподелу (због највећих бројних вредности и брзине промене).

Дистрибуција напона је значајна у свим случајевима у којима је могуће или се захтева физичко нарушавање континуума ради прогнозирања стања при таквим захватима. Обзиром на редослед у технолошким поступцима код производа од металних материјала, практично је у свим случајевима присутно нарушавање континуума, најчешће завршном машинском обрадом. Због тога су у овим истраживањима извршена мерења (на три узорка различитог пречника) ефеката који прате доминантну машинску обраду код шипкастих материјала - стругање.

Поступак одређивања еластичне линије и математичка обрада резултата су већ дати. У складу са наглашеним карактеристикама дистрибуције код сва три узорка је планирано смањење пречника на половину полазног пречника вучене шипке. Због тешкоћа тачног извођења експеримента, код вучене шипке $d = 15 \text{ mm}$, експеримент је прекинут на положају $r = 0,78 R_o$. Код друга два пречника експеримент је практично спроведен у потпуности.

Како је је закључено у поглављима 3.6.3.2 и 3.6.3.3, добијени резултати за еластичну линију са становишта могућности апроксимације по моделним једначинама А и Б (након спроведене машинске обраде) не разликују се од вученог стања, односно стања са изворним заосталим напонима. То се јасно види и са слике 3.46 за узорак 10, након смањења пречника приближно на половину пречника вучене шипке. Наиме, прорачунати напони, добијени из три третирана случаја еластичне линије, задржавају све карактеристике напона вученог стања приказано на слици 3.38. Разлике су искључиво у бројним вредностима напона дуж комплетне еластичне линије. Међутим, на основу претпоставке о константности коефицијента уз линеарни члан у моделу Б, долази до знатног повећања удела линеарног члана у вредностима еластичне линије и угиба. Оваква промена је у складу са анализом утицаја заковичног споја, а и физички је потпуно оправдана обзиром да, при извођењу експеримента, машинска обрада није вршена преко заковичног споја (растављеног и нерастављеног). Услед тога, утицај линеарног члан код узорка 1 има вредност приближно 0,9 непосредно уз нерастављени заковични спој и мења се до 0,45 на крају отвора. Код узорка 9 се те вредности крећу 0,95 до 0,65 већ код пречника 17,3 mm. У складу са већ назначеним повећањем удела еластичног члана са порастом пречника, највеће



Слика 3.46 - Заостали напони на површини узорка 10 после обраде стругањем са пречника 40 mm на пречник 20,6 mm

вредности се достигну код узорка 10 које већ код пречника 23mm прелазе 0,95. Овако висока вредност линеарног члана у еластичној линији доводи у питање применљивост методе у области угиба насталих код последњих операција обраде, а тиме и тачност одговарајућих вредности момента и напона. Практично, линеарни пораст вредности угиба је са високим степеном корелације, па је непотребно коришћење једначина које садрже чланове са већим степеном променљиве z . Ако се, пак, одбаце резултати на почетку и на крају узорка, у складу са препорукама Хункија, онда је квадратни члан у једначини занемарљив, што значи да је и други извод једнак нули. Међутим, грешка апроксимације (СКГ) са једначином А у овим случајевима није већа од вредности које су добијене код вученог стања и стања у току комплетне машинске обраде. Значајно је такође напоменути да није реално претпоставити да се изворна поставка моментног оптерећења мења, што потврђује слагање тока дијаграма прорачунатих вредности напона (на пр. код најнеповољнијег случаја завршно машински обрађеног узорка 10, слика 3.46 и вученог стања истог узорка, слика 3.41). Овде је потребно уочити и поклапање три вредности напона (експериментално, по моделу А и по моделу Б) на већ идентификованом z -положају.

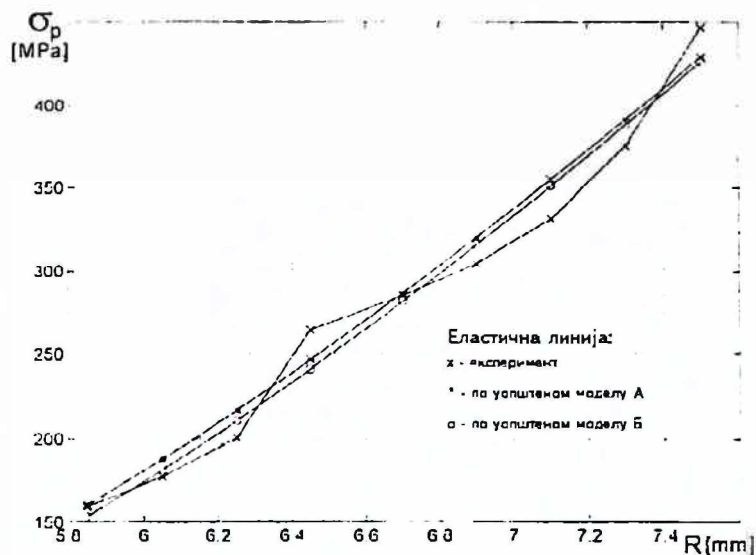
Премда у литератури нема директних података о резултатима оваквих експеримената, у радовима Пајтера за механичке поступке одређивања напона препоручује се мерење у три тачке - код извођења једначина еластичне линије, односно радијуса кривине код раванског напонског стања. Због тога је и у наставку задржана методологија као код вученог стања.

Прорачунате вредности напона на површини узорка 1 на основу експерименталних резултата за угиб, као и резултата прорачунатих по моделима приказани су у табели 3.11 и на слици 3.47. Континуирано смањење угиба на одабраном z -положају изазива смањење напона. Овај ефекат може да се прорачуна са високом корелацијом по уопштеним моделима А и Б, што јасно илуструју подаци у табели 3.11 и на слици 3.47. Тако су код узорка 9 и 10, након комплетне машинске обраде, вредности напона σ_p сведене на 28,4, односно 79,2 МПа.

Табела 3.11 Вредности заосталих напона на површини узорка 1 одређени на помаку $z = 200 \text{ mm}$ за вучено и машински обрађена стања, за експерименталне вредности по појединачним и уопштеним моделима А и Б

Линије еластичног угиба	Напони на површини за помак $z = 200 \text{ mm}$, [MPa]								
	ПРЕЧНИК/СТАЊЕ [mm]								
	15 - В	14,6 - М	14,2 - М	13,8 - М	13,4 - М	12,9 - М	12,5 - М	12,1 - М	11,7 - М
Експерименталне вредности	446,7	375,4	331,1	304,4	285,0	264,6	200,5	177,3	159,6
Прорачунато по моделу А	452,5	379,8	337,5	309,2	290,3	269,2	205,8	182,3	165,8
Прорачунато по моделу Б	446,7	374,5	332,5	303,8	284,7	264,4	200,9	177,7	161,3
По уопштеном моделу А	428,9	391,1	354,8	319,9	286,5	246,7	216,5	187,8	160,4
По уопштеном моделу Б	426,2	387,7	350,8	315,4	281,4	241,0	210,4	181,3	153,6

В - вучено стање ; М - машински обрађено стање



Слика 3.47 - Промена заосталих напона на површини настала обрадом узорка 1

3.6.4.6 Извођење једначине за опис редистрибуције напона

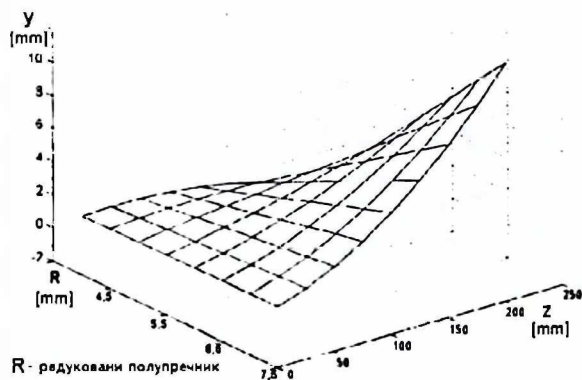
Графички приказ прорачунатих вредности за еластичну линију код узорка 1 у (r - z) координатама по уопштеном моделу Б приказани су на слици 3.48. Област промене r -координате је изабрана до вредности у којој је екстраполисана вредност једнака нули. Област промене z -координате је задржана као код извођења уопштених модела еластичне линије. Прорачунате вредности напона σ_p на одабраним z -положајима одговарају вредностима које су приказане на слици 3.47. На основу таквих вредности σ_p прорачунате су вредности напона по попречном пресеку, и за линеарни модел дистрибуције напона, приказане на слици 3.49. Ако величина угиба екстраполише до нуле, то ће се и вредност напона смањити до нуле. Пратеће промене напона по попречном пресеку ће зависити од модела дистрибуције напона. Разлике између модела су знатне, а њихова промена компликована, како је то илустровано на слици 3.50 за квадратну и линеарну дистрибуцију. Резултати код осталих узорака су аналогни.

Ако се примени екстраполација моделне једначине за еластичну линију и угиб на област $[r_{y=0} \div r = 1\text{mm}]$ и прорачунају вредности напона на површини и по пресеку за линеарни модел дистрибуције, добијају се резултати приказани на слици 3.51. Дијаграми показују да се, у случају прихватања екстраполације у овој области као егзактне за прорачун напона на површини, а на основу уравнотежености напона по попречном пресеку, добија ефекат промене знака напона на површини и у оси, након њихове потпуне релаксације на положају $r_{y=0}$. Како прелаз из стања потпуне релаксације у стање са стварањем нових градијената напона није реалан, то искључује примену екстраполације при коришћењу овог модела на издвојену област r -координате.

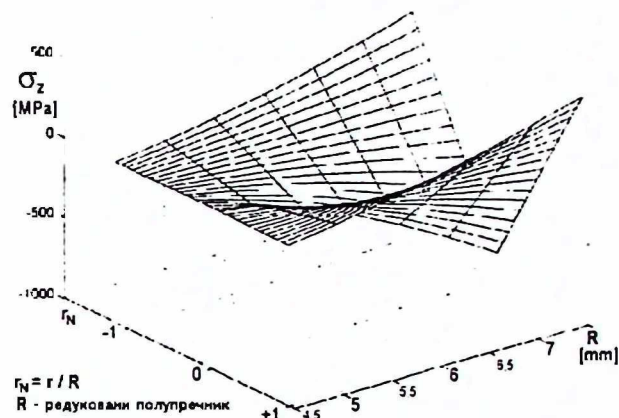
Обзиром да је то наглашено као значајно, у наставку рада је извршена даља анализа редистрибуције напона у спорној области, у којој је примењена екстраполација. Да би се прогнозирано понашање у овој области, потребно је израдити физички прихватљив модел за целокупну редукцију пречника у којој се

прати редистрибуција напона. Тако је на почетку издвојен линеаран модел дистрибуције напона по попречном пресеку као преферентан. То значи да у полазном вученом стању дистрибуција напона по попречном пресеку одговара једначини:

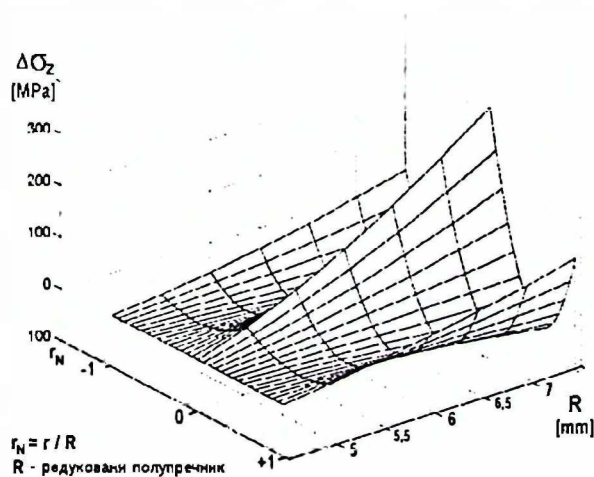
$$\sigma_{zv} = \sigma_{pv} \left[3 \cdot \frac{r}{R_0} - 2 \right]$$



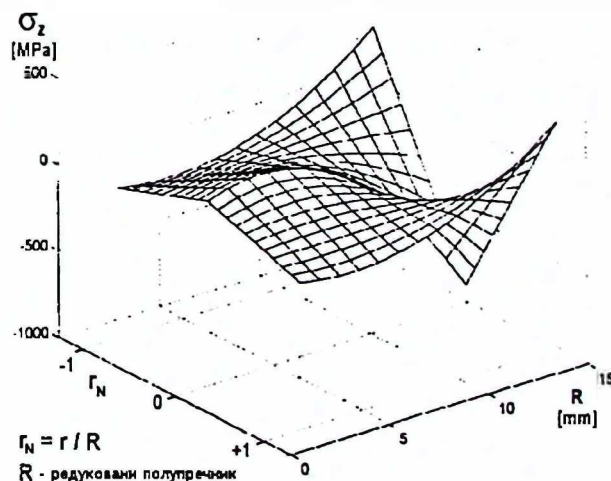
Слика 3.48 - Еластична линија за узорак 1 у (r - z) координатама



Слика 3.49 - Редистрибуција заосталих напона по попречном пресеку за линеарну дистрибуцију за узорак 1



Слика 3.50 - Разлике заосталих напона по квадратном и линеарном моделу дистрибуције за узорак 1



Слика 3.51 - Екстраполација моделне једначине Б на област $r < r_{y=0}$ за узорак 1

Такође је реално претпоставити да се код машинске обраде стругањем у једном пролазу уклања еластична енергија која је припадала том слоју, односно напон на новој површини задржава вредност који одговара датом r-положају у вученом стању. Формирање нове површине са напонам σ_{p1} има за последицу успостављање нове равнотеже (унутар ново-створеног узорка) која задржава полазни модел дистрибуције по попречном пресеку. То значи да је:

$$\sigma_{p1} = \sigma_{pV} \quad \text{за} \quad r = r_V - \Delta$$

где је Δ - дубина стругања (попечни посмак) у [mm], односно:

$$\sigma_{p1} = \sigma_{pV} \left[3 \cdot \frac{r_V - \Delta_1}{r_V} - 2 \right] = \sigma_{pV} \left[\frac{r_V - 3\Delta_1}{r_V} \right]$$

$$\sigma_{z1} = \sigma_{p1} \left[3 \frac{r}{r_V - \Delta_1} - 2 \right]$$

За наредни пролаз се примењују исте претпоставке, па је

$$\sigma_{p2} = \sigma_{pV} \frac{r_V - 3\Delta_1}{r_V} \cdot \frac{r_V - 3\Delta_1 - \Delta_2}{r_V - \Delta_1}$$

напон на површини после другог пролаза са Δ_2 - дебљином скинутог слоја. Ако је $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta = \text{const.}$, претходна релација добија облик:

$$\sigma_{p2} = \sigma_{pV} \frac{r_V - 3\Delta}{r_V} \cdot \frac{r_V - 4\Delta}{r_V - \Delta} = \sigma_{p1} \frac{r_V - 4\Delta}{r_V - \Delta}$$

При даљој обради са истом дебљином Δ ће се у једначини добити облик:

$$\sigma_{pn} = \sigma_{p,n-1} \frac{r_V - (n+2)\Delta}{r_V - (n-1)\Delta},$$

односно

$$\sigma_{pn} = \sigma_{pV} \frac{r_V - 3\Delta}{r_V} \cdot \frac{r_V - 4\Delta}{r_V - \Delta} \cdot \dots \cdot \frac{r_V - (n+2)\Delta}{r_V - (n-1)\Delta}$$

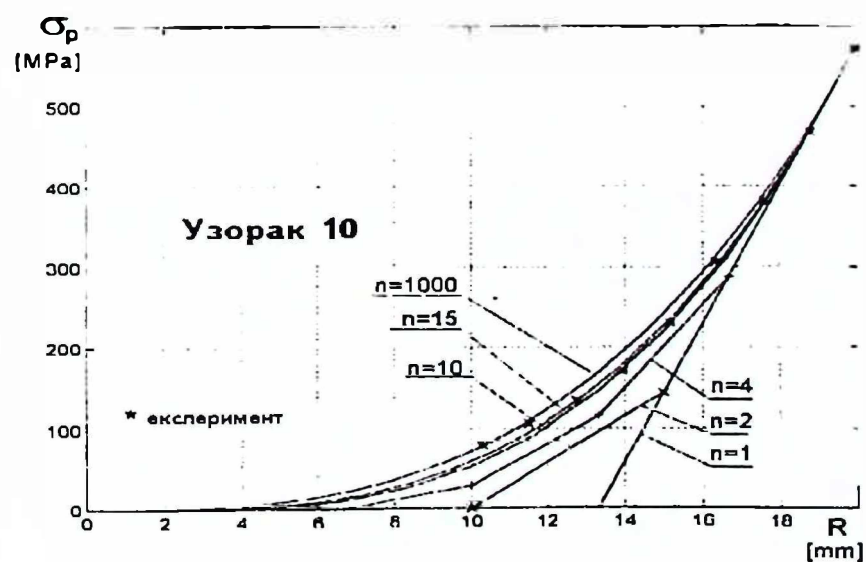
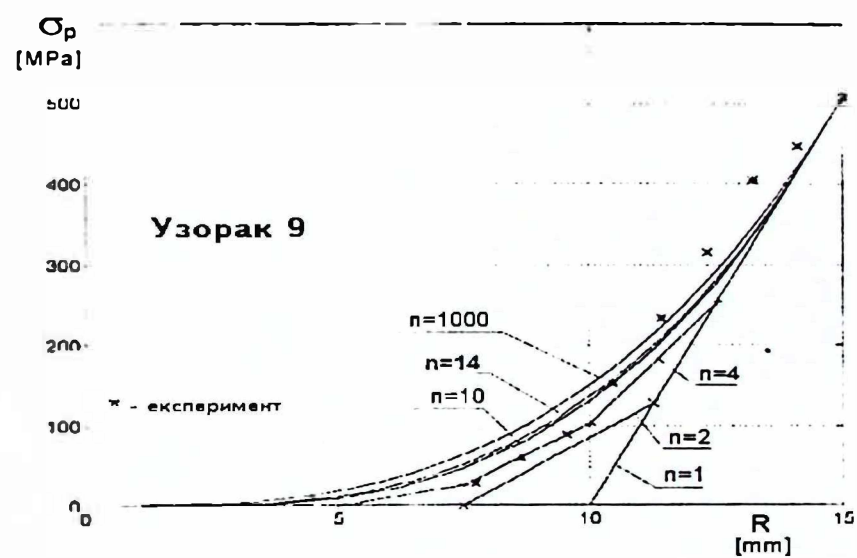
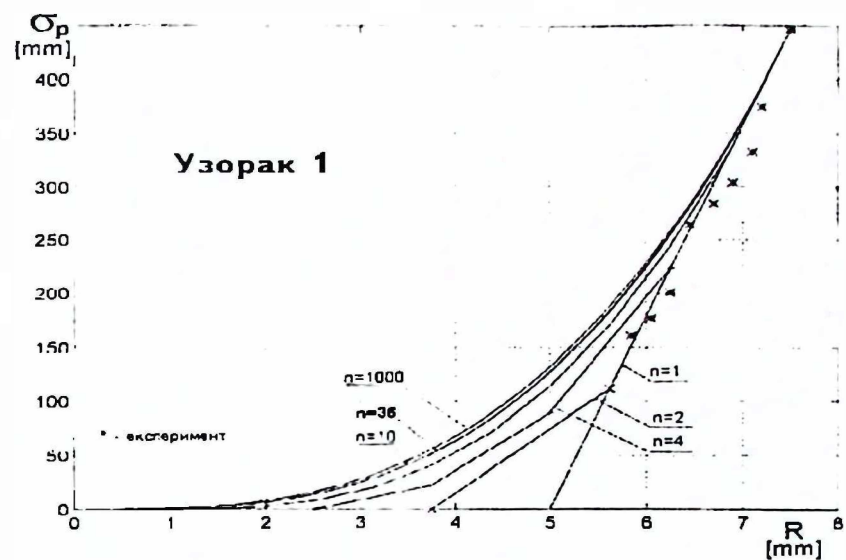
Ова једначина се може написати у облику:

$$\frac{\sigma_{pn}}{\sigma_{pV}} = \prod_{i=1}^n \left[\frac{r_V - (i+2)\Delta}{r_V - (i-1)\Delta} \right]$$

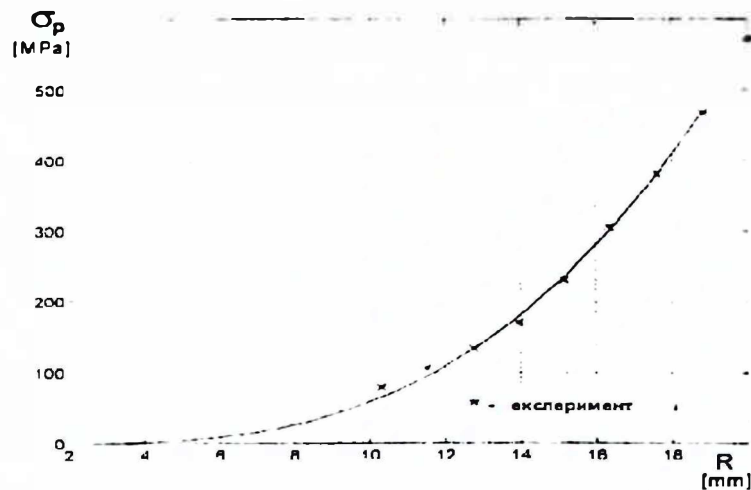
Упоредне вредности напона прорачунате по овој једначини и вредности напона које су претходно одређене за узорке 1, 9 и 10 су дате у табелама 3.12 и 3.13. За узорак 10 су упоредо приказане и вредности напона за остале моделе дистрибуције. Најближе вредности из прве колоне са линеарним моделом дистрибуције у вученом узорку су потенцијале опредељење за линеарну дистрибуцију. Истовремено се може уочити да је висока корелација прорачунатих вредности по моделу дистрибуције оправдала полазна опредељења.

Табела 3.12 Упоређење вредности аксијалних заосталих напона на површини узорка (са редукованим полупречником r) прорачунати на основу модела еластичне линије са напонима прорачунатим по различитим моделима дистрибуције (на адекватном r - пресеку) и напонима на површини прорачунатим на основу модела редистрибуције напона

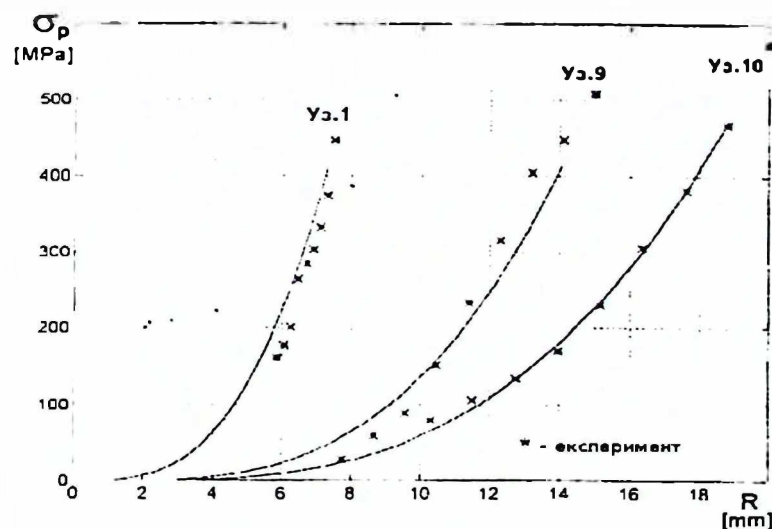
Узорак 10	Напони прорачунати на основу еластичне линије σ_p [MPa]		Напон $\sigma_z(r)$ [MPa] за модел дистрибуције				σ_p [MPa] модел реди- стрибуције
r [mm]	појединачни модел Б	уопштени модел Б	Линеарни	Квадратна	Трећег степенa	Четвртог степенa	Линеарни
20	573	544	573	573	573	573	573
18,8	476,4	460,6	469,9	439,6	411,2	384,6	469,9
17,6	381,9	383,5	366,7	314,5	268,8	228,9	379,9
16,35	306,2	310,2	259,3	192,9	139,8	97,4	301,1
15,,15	229,9	246,6	156,1	84,6	33,1	-3,5	234,8
13,95	170,4	189,2	53,0	-15,5	-57,9	-83,1	176,7
12,75	134,0	138,4	-50,1	-107,3	-134,6	-144,5	131,1
11,50	105,8	92,4	-157,6	-194,1	-200,5	-192,5	93,6
10,30	79,2	54,9	-260,7	-269,1	-251,6	-226,1	64,3



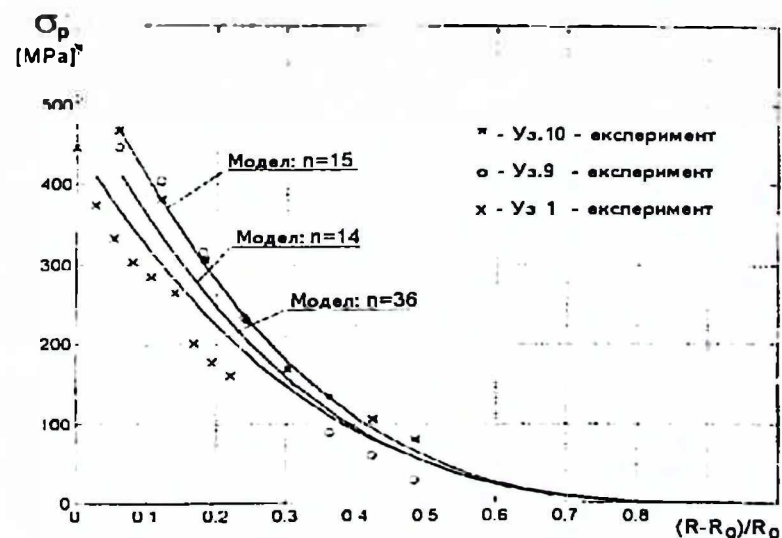
Слика 3.52 - Редистрибуција напона на површини испитиваних узорак добијена експериментално и прорачуната на основу модела редистрибуције при различитим вредностима



Слика 3.53 - Упоређење експерименталних напона на површини и прорачунатих по моделу редистрибуције за узорак 10



Слика 3.54 - Упоређење експерименталних напона на површини и прорачунатих по моделу редистрибуције за узорке 1, 9 и 10 у функцији ред. пречника



Слика 3.55 - Упоређење експерименталних напона на површини и прорачунатих по моделу редистрибуције у функцији релативног смањења пречника

Претходна једначина која је изведена као модел редистрибуције напона садржи све релевантне параметре: полазну вредност напона на површини (σ_{pv}), полазни пречник ($R_0 = r_v$), дебљину уклоњеног слоја у једном пролазу (Δ), односно број операција (n). Физичка заснованост једначине је евидентна на основу услова $\sigma_{pn} = 0$, односно:

$$r_v - (n + 2)\Delta = 0$$

или:

$$\Delta = \frac{r_v}{n + 2},$$

што потпуно усаглашава дебљину скинутог слоја у односу на полазни пречник и број операција скидања ради редистрибуције заосталих напона, т.ј. њиховог уклањања.

Графички приказ редистрибуције за изабране вредности n код узорка 1, 9 и 10 дат је на слици 3.52. Ако би се машинска обрада код узорка 10 наставила, вредности σ_p би се смањиле у складу са кривом приказаном на слици 3.53. Код овог узорка су разлике у дебљини скинутих слојева код појединих операција најмање, па се усвајањем константног скинутог слоја прави најмања грешка.

Упоредни дијаграми редистрибуције напона за сва три узорка који одговарају најближем целом броју операција са константном дебљином слоја у функцији пречника су приказани на слици 3.54, а у функцији релативног смањења пречника на слици 3.55. Дијаграми, такође, садрже експерименталне вредности напона.

У оба случаја је евидентно, поред добре корелације експеримента и модела, и физички реално понашање у области екстраполације, т.ј. у области од измерене вредности која одговара најмањем редукованом пречнику па до $r = 0$.

3.6.5 Испитивање механичких особина

Карактеризација материјала са становишта механичких особина је вршена код полазног стања материјала и у свим фазама третмана шипки у складу са планом испитивања. Најзначајнији део резултата се односи на испитивање затезањем и показатеље отпора метала деформацији $R_{p0.2}$ и R_m . Резултати испитивања ових показатеља, као и модула еластичности E , код полазних топловаљаних шипки приказани су у табели 3.14. Вредности дате у табели показују да се код полазног стања могу добити механичке особине које су измењене у односу на познати утицај хемијског састава (код челика Č.4121 су ниже вредности $R_{p0.2}$ за пречник 42 mm него код истог пречника шипки од челика Č.1221) и утицај пречника (код истих ових челика су ниже вредности $R_{p0.2}$ и R_m за пречник 16 mm него за пречник 32 mm). Нешто измењена ситуација је код челика Č.4721 (Cr - Мо челик). За модул еластичности ниже су вредности код угљеничног челика од остала два легирана челика, али се резултати код истог хемијског састава понашају слично као $R_{p0.2}$ са променом пречника шипке.

Овакви полазни материјали задржавају разлике у свим наредним циклусима третмана шипки што знатно компликује њихову анализу и могућност компарације. Због тога ће се у наставку приказати и анализирати само они резултати који непосредно омогућавају оцену ефеката заосталих напона на механичке особине.

Табела 3.14 Механичке особине полазних шипки

Челик	E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	Челик	E GPa	R _{p0.2} MPa	R _m MPa
Č.1221 Ø 16	191,4	275	434,2	Č.4121 Ø 16	203,4	328	479,6
Ø 32	197,5	310,7	458,4	Ø 32	215,2	369,4	522,3
Ø 42	199,2	310,7	453,3	Ø 42	214	302,5	463
Č.4721 Ø 16	204,6	386,4	666,7	Č.4721 Ø 32	210,9	316,4	515,5

Упоредни резултати промене R_{p0.2} и R_m за топловаљане, вучене и равнате шипке пречника 14, 30 и 40 mm од челика Č.1221 приказани су у табели 3.15 и на дијаграму - слика 3.56.

Пошто је методом рентгенске дифракције откривено присуство радијалних напона код топловаљаних шипки, након процеса равнања извршено је рекристализационо жарење и одређене су механичке особине код жарених шипки. Ови резултати су приказани у поменутим табелама. Осим механичких особина код свих стања су приказане карактеристике деформационог ојачавања и крива стварни напон - стварна деформација, тј. коефицијенти за опис деформационог ојачавања по Лудвиковој једначини:

$$K_f = K \cdot \varphi^n,$$

где су: K_f - стварни напон; K - коефицијент чврстоће; n - индекс деформационог ојачавања; $\varphi = \ln l_1 / l_0$ - логаритамски степен деформације при затезању.

Табела 3.15 - Механичке особине узорка од челика Č.1221

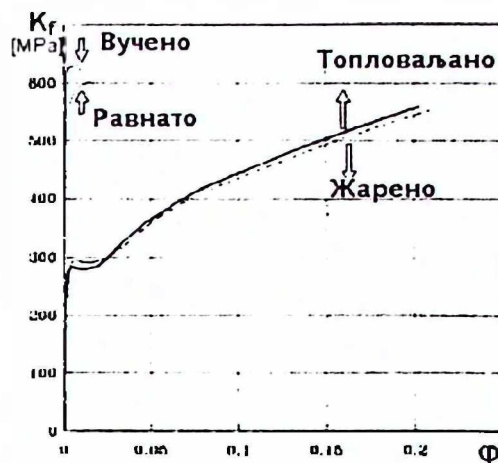
УЗОРАК	Материјал	Φ ₀ [mm]	Φ _v [mm]	Угао матрице	Мазиво	БВ [m/s]
3	Č.1221	16	14,5	0,314 rad	уље	0,35
О С О Б И Н Е			СТАЊЕ МАТЕРИЈАЛА			
Назив	Ознака	Јединица мере	Топло ваљано	Вучено	Равнато	Жарено
Граница течења	R _{p0.2}	MPa	275,02	595,88	532,22	285,21
Затезна чврстоћа	R _m	MPa	434,18	623,89	592,06	424,76
Индекс деф.ојач.	n	-	0,300	0,007	0,024	0,310
Коефици. чврстоће	K	-	908,81	650,50	664,85	889,70

УЗОРАК	Материјал	Φ_0 [mm]	Φ_v [mm]	Угао матрице	Мазиво	БВ [m/s]
II	Č.1221	32	30	0,314 rad	уље	0,35
О С О Б И Н Е			СТАЊЕ МАТЕРИЈАЛА			
Назив	Ознака	Јединица мере	Топло ваљано	Вучено	Равнато	Жарено
Граница течења	$R_{p0.2}$	МПа	310,67	560,23	560,23	336,14
Затезна чврстоћа	R_m	МПа	458,37	567,87	571,44	460,91
Индекс деф.ојач.	n	-	0,230	0,012	0,026	0,200
Коефици. чврстоће	K	-	846,41	608,84	659,40	804,13
УЗОРАК	Материјал	Φ_0 [mm]	Φ_v [mm]	Угао матрице	Мазиво	БВ [m/s]
није означ. у таб. 3.4	Č.1221	42	40	0,314 rad	уље	0,35
О С О Б И Н Е			СТАЊЕ МАТЕРИЈАЛА			
Назив	Ознака	Јединица мере	Топло ваљано	Вучено	Равнато	Жарено
Граница течења	$R_{p0.2}$	МПа	310,67	570,42	565,32	384,52
Затезна чврстоћа	R_m	МПа	453,28	577,04	567,36	483,84
Индекс деф.ојач.	n	-	0,260	0,018	0,009	0,169
Коефици. чврстоће	K	-	876,69	633,40	597,10	795,57

Коефицијенти су одређени методом минимизације средњег квадратног одступања. Пошто једначина овде није непосредно коришћена за квантификацију ефекта деформационог ојачавања, то није анализирана њена тачност која (као што је познато) може бити проблематична у комплетном интервалу степена деформације.

Упоређењем вредности за вучено и равнато стање могу се добити подаци о утицају равнања на механичке особине. Тако је очигледно да примењени поступак равнања код шипки пречника 14 mm изазива смањење $R_{p0.2}$ и R_m , слика 3.56. Иако је израда епрувета пречника 10 mm праћена редистрибуцијом заосталих напона и код вученог и код равнатог стања, очигледне су разлике механичких особина ова два стања.

При дејству спољашњег напона је за понашање елемената меродавно резултантно оптерећење ефективног спољашњег и унутрашњег напона. Унутрашњи напони су радијални и обимни негативни (притисни) по знаку и међусобно блиски по вредности. Промене код ових напона при равнању шипки су праћене смањењем њихових апсолутних вредности без промене знак. Аксијални напони су по



Слика 3.56 - Крива напон (K_f) - деформација (ϕ) код различитих стања челика Č.1221

линеарном моделу дистрибуције, такође доминантно присутни на попречном пресеку вучене шипке, будући да линеарна дистрибуција подразумева притисне напоне на 50 % већој површини од затезних напона и са интензитетом који је на оси два пута већи од интензитета на површини, па отуда и са већом средњом вредношћу на попречном пресеку. Кодравнања се мењају аксијални напони у површинском слоју прелазећи у притисне; у централном делу они задржавају знак као код вучених, али се њихов интензитет смањује. На тај начин се може сматрати да је у оба случаја централни део шипке у притисном напонском стању, с том разликом што су код равнатог стања све компоненте напона смањених интензитета. Такво напонско стање ће у складу са упрошћеним моделом датим у делу 2.5 представљати предоптерећење, смањивати ефективни затезни напон, одлагати почетак течења и тако изазивати разлике у вредностима $R_{p0.2}$. Без обзира што се машинском обрадом врши редистрибуција напона, задржавају се све битне карактеристике изворног стања, па је и уочени ефекат предоптерећења дошао до изражаја код епрувета пречника 10 mm. Различита промена компоненти напона изазвана равнањем очигледно смањује ефективни заостали напон, па се и граница пластичног течења смањује.

Различита граница почетка пластичног течења се манифестује и на комплетан интервал пластичне деформације, да би због већег интервала пластичности равнатог стања разлике вредности R_m биле нешто блаже.

Резултати за пречник 30 и 40 mm су приказани у табели 3.15 и показују да је промена R_m и $R_{p0.2}$ равнањем вучених шипки занемарива, што би значило да се машинском обрадом до 10 mm пречника епрувете практично неутралишу ефекти заосталих напона.

Промене које се јављају код челика Č.4721 су још израженије него код челика Č.1221, па је разлика вученог и равнатог стања евидентна и за пречнике шипки 30 и 40 mm, табела 3.16. Исти резултати су добијени и за челик Č.4121.

Овде се мора имати у виду да наизменично савијање са малом пластичном деформацијом има позитиван ефекат на ослобађање енергије нагомилане у процесу пластичне деформације будући да омогућава одвијање процеса у деформисаној структури за коју је неопходна активациона енергија (која прати релаксацију заосталих напона). Како је већ уочено ти процеси су тешко раздвојиви, те се и ефекти не могу појединачно идентификовати.

Значајни утицајни фактори на укупну релаксацију су у овом случају степен редукције попречног пресека и структура.

Степен редукције попречног пресека је:

- при вучењу $\Phi 16 \rightarrow \Phi 14$ mm : $\varphi=0,267$;
- при вучењу $\Phi 32 \rightarrow \Phi 30$ mm : $\varphi=0,129$;
- при вучењу $\Phi 42 \rightarrow \Phi 40$ mm : $\varphi=0,098$.

Табела 3.16 - Механичке особине узорка од челика Č.4721

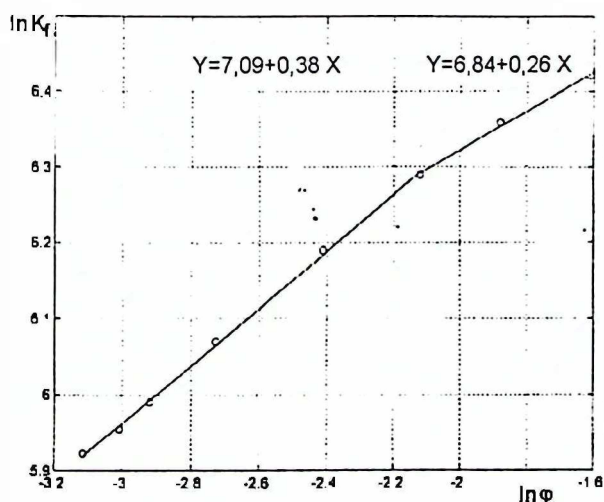
УЗОРАК	Материјал	Φ_o [mm]	Φ_v [mm]	Угао матрице	Мазиво	БВ [m/s]
није означ. у таб 3.4	Č.4721	16	14	0,314 rad	уље	0,35
О С О Б И Н Е			СТАЊЕ МАТЕРИЈАЛА			
Назив	Ознака	Јединица мере	Топло ваљано	Вучено	Равнато	Жарено
Граница течења	$R_{p0,2}$	МПа	366,7	774,1	677,4	374,3
Затезна чврстоћа	R_m	МПа	664,6	822,5	830,2	539,9
Индекс деф.ојач.	n	-	0,214	0,022	0,060	0,254
Коефиц. чврстоће	K	-	1201,9	918,9	1073,6	1052,6
УЗОРАК	Материјал	Φ_o [mm]	Φ_v [mm]	Угао матрице	Мазиво	БВ [m/s]
9	Č.4721	32	30	0,314 rad	уље	0,35
О С О Б И Н Е			СТАЊЕ МАТЕРИЈАЛА			
Назив	Ознака	Јединица мере	Топло ваљано	Вучено	Равнато	Жарено
Граница течења	$R_{p0,2}$	МПа	322,4	595,9	539,9	438,0
Затезна чврстоћа	R_m	МПа	502,9	634,1	611,2	538,1
Индекс деф.ојач.	n	-	0,256	0,022	0,036	0,179
Коефиц. чврстоће	K	-	987,9	711,4	725,8	904,4

Полазне топловаљане шипке су биле пречника 18 mm, а машински су обрађене на пречник 16 mm. Испитивања затезањем су вршена на пропорционално кратким епруветама пречника 12,6; 11,2; 9,7 и 7,6 mm. Испитивања притискивањем су обављена на узорцима истог пречника као код затезања. Висина узорака је била 1,5 пречника. Епрувета за динамичко затезање је приказана у делу описа метода. Епрувета за динамичко савијање је била изворна, вучена/равната шипка.

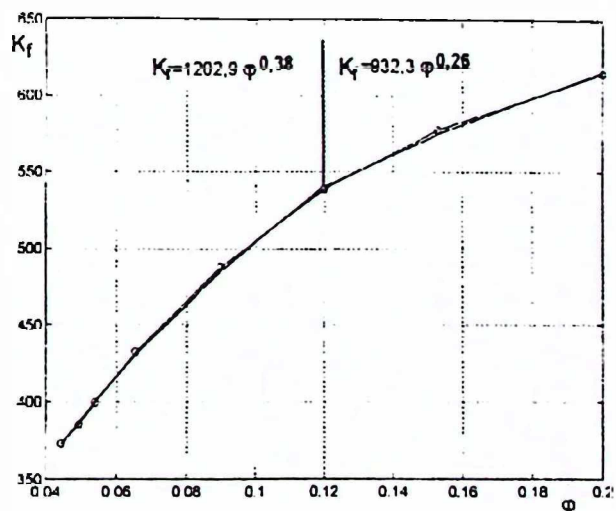
У свим случајевима је испитано по 5 узорака и као меродавна је узета средња вредност. Резултати ових испитивања су приказани у табели 3.18.

3.6.5.1 Деформационо ојачавање челика

Деформационо ојачавање челика је одређено испитивањем на затезање. Дијаграми са вредностима силе и издужења су прерачунати на стварни напон - стварна деформација. Изабране тачке су у логаритамском координатном систему приказане на слици 3.57. Очигледно је да се област ојачавања може поделити на два подручја и апроксимирати одговарајућим правим линијама. Једначине ових правих и изворне једначине представљају Лудвикову једначину чији су коефицијенти приказани упоредо, на слици 3.58. Пресечна тачка се налази на положају $\phi \approx 0,12$. Овакав опис деформационог ојачавања тзв. "2п"-поступак веома добро апроксимира стварно деформационо ојачавање.



Сл. 3.57 - Дијаграм деформационог ојачавања у процесу затезања ("2 - п") интервал



Сл. 3.58 - Упоредба измерених и прорачунатих вредности деформационог ојачавања

Ако се узме да је ефективни степен деформације у процесу вучења једнак степену редукције попречног пресека, онда ефективни степени деформације у програму вучења износе: 0,129 ; 0,197 и 0,267. У сва три случаја ови степени деформације се налазе у горњој области деформационог ојачавања. На основу једначине за горњи интервал прорачунате су вредности напона течења: 550,2 ; 613,6 и 663,6 МПа, те респективне разлике по основу деформационог ојачавања износе 63,4 и 50 МПа. Сви ови подаци су приказани у табели 3.19.

Табела 3.18 Механичке особине топловаљаних, вучених и равнатих шипки Č.1221

СЕРИЈА	Пречник епрувете [mm]	ИСПИТИВАЊЕ ЗАТЕЗАЊЕМ					ИСПИТ. ПРИТИС.
		R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A _r [%]	A _u [%]	З [%]	R _{p0,2} [MPa]
0	10	364,4	507,7	18,5	28,5	66,2	-
I	15	-	-	-	-	-	-
	12,6	639,7	654,2	2,57	12,7	57,9	546,5
	11,2	627,5	645,2	-	12,7	57,5	581,2
	9,7	643,3	656,9	2,28	12,9	56,3	593,4
	7,6	635,6	644,9	2,64	13,3	57,7	609,5
II	15	-	-	-	-	-	-
	12,6	665,4	682,9	1,43	11,3	55,0	557,7
	11,2	666,4	684,5	1,08	10,8	55,9	626,8
	9,7	668,8	684,6	0,72	10,8	54,9	657,8
	7,6	666,6	678,6	0,57	10,8	54,5	661,2
III	15	-	-	-	-	-	541,2
	12,6	709,5	727,1	1,62	11,0	52,4	571,1
	11,2	718,3	731,7	0,99	9,7	51,2	628,9
	9,7	732,7	741,4	0,59	9,7	-	662,3
	7,6	731,5	739,1	0,37	9,8	51,9	-
IV	15	-	-	-	-	-	-
	12,6	628,7	642,3	0,96	11,6	56,3	543,9
	11,2	-	-	-	-	-	-
	9,7	-	-	-	-	-	577,9
	7,6	617,2	638,6	0,73	12,2	58,1	589,9
V	15	-	-	-	-	-	549,7
	12,6	-	-	-	-	-	-
	11,2	-	-	-	-	-	634,7
	9,7	-	-	-	-	-	636,0
	7,6	-	-	-	-	-	-
VI	15	-	-	-	-	-	521,4
	12,6	698,5	714,0	1,09	10,4	51,8	581,5
	11,2	-	-	-	-	-	629,0
	9,7	-	-	-	-	-	648,6
	7,6	721,9	731,1	0,5	9,6	50,0	645,6

Табела 3.19 Прорачунате вредности деформационог ојачавања у процесу вучења

Ознака узорка	Вучење	Степен дефор. попр. пресека	Напон течења у вученом стању по једначини	Разлика напона
I	$\Phi 16 / \Phi 15$	0,129	550,2	-
II	$\Phi 16 / \Phi 14,5$	0,197	613,6	+ 63,4
III	$\Phi 16 / \Phi 14$	0,267	663,6	+ 50,0

3.6.5.2 Механичке особине при статичком дејству силе

Резултат испитивања механичких особина затезањем епрувета различитог пречника, приказани у табели 3.18 показују да су за вучено стање јасне разлике у вредностима R_m и $R_{p0.2}$ код различитог степена редукције попречног пресека. Те разлике између узорка I и II су мање од разлике дате у табели 3.19, док су разлике између узорка II и III веће. У првом случају је то израженије (до 40 МПа) него у другом (до 20 МПа). Ово се не може сигурно приписати само заосталим напонима, мада су вредности такве да упућују на њихов доминантни утицај. Наиме, високе вредности заосталих напона код узорка I, ниже код узорка II и најниже код узорка III, могу ефективно повећати $R_{p0.2}$ код узорка I у односу на узорак II, односно II у односу на III. Међутим, и распон промена степена редукције попречног пресека знатно мења модел течења (у складу са поглављем 3.6.1), па се и разлике ефективног степена деформације не могу прецизно свести на редукцију пресека.

Промена пречника епрувете показује ефекат само код шипки пречника 14 mm за пречник епрувета 12,6 и 11,2 mm, и шипке пречника 15 mm за епрувету 11,2 mm. У осталим случајевима је разлика у границама дисперзије, односно средње квадратне грешке. Овакво понашање је очекивано будући да се машинском обрадом врши редистрибуција напона и то равномерно код свих компоненти. То значи да ефективни заостали напон може остати приближно константан, па је и његов утицај на радни затезни напон практично постојан. Ефекат код узорка I и III (до 22 МПа) је практично разлика која се може очекивати као последица дејства великог броја утицајних фактора (материјал, технологија вучења, машинска израда епрувета,...)

Затезна чврстоћа код вученог стања има иста обележја као $R_{p0.2}$.

Код равнатог стања у односу на вучено стање вредности $R_{p0.2}$ су ниже, како је то већ раније утврђено, али је смањење сведено на испод 4 %. Код два пречника епрувета добијен је обрнут утицај код узорка IV и VI (такође са разликама до 22 МПа).

Промена показатеља пластичности (хомогеног издужења, укупног издужења и контракције) је уочљива и са очекиваним смањењем свих показатеља при повећању степена редукције. Повећање пречника епрувете смањује ове разлике нарочито код хомогеног издужења, што значи да за прецизирање разлика треба користити мање пречнике епрувета.

Вредности границе течења при притискивању су приказане у табели 3.18. Треба истаћи да је испитивање овом методом доста проблематично, због чега поједини резултати нису добијени ни после поновљеног испитивања. Поред тога, узорци за испитивање имају на мерном делу две слободне површине на веома кратком растојању (што значи са напонима нормалним на површину једнаким нули).

Добијене резултате карактерише следеће:

- Почетак пластичног течења је у свим случајевима нижи од вредности добијених код затезања;
- Вредности се несразмерно повећавају са повећањем степена редукције шипки;
- Пречник узорка показује изразити утицај на почетак пластичног течења, тако да мањи пречници имају веће вредности границе пластичног течења.

Разлика у односу на затезање је највећа код пречника узорака 12,6 mm и износи 93 МПа код серије I, 108 МПа код II и 138 МПа код шипки серије III. Разлике се смањују код нижих пречника епрувета и то практично на половину - код шипки од 14 и 15 mm, а елиминишу код вучених шипки од 14,5 mm. Разлика у односу на затезање је разумљива последица промене знака напона (Баушингеров ефекат), као и утицаја заосталих напона који олакшавају почетак пластичног течења.

Степен редукције у овом случају утиче на разлике серије I и II, док су разлике између II и III минималне. Ако се прихвати резултат добијен при затезању о практично константном ефективном напону, онда се добијени резултати код различитог пречника епрувете могу приписати утицају примарног течења, односно Баушингеровог ефекта. Ова разлика код серије II износи 125 МПа што је блиско максималној разлици између резултата затезања и притискивања. Уједно овакве вредности чине неоправданим детаљније анализирање утицаја заосталих напона. Међутим, значајно је нагласити да исти карактер промене имају резултати за равнато стање што је поуздан знак да се ефекат приоритетног смера течења не елиминише равнањем (са наизменичним превијањем). Стога није целисходно вршити ни детаљнија анализа промена добијених код равнања у односу на вучено стање.

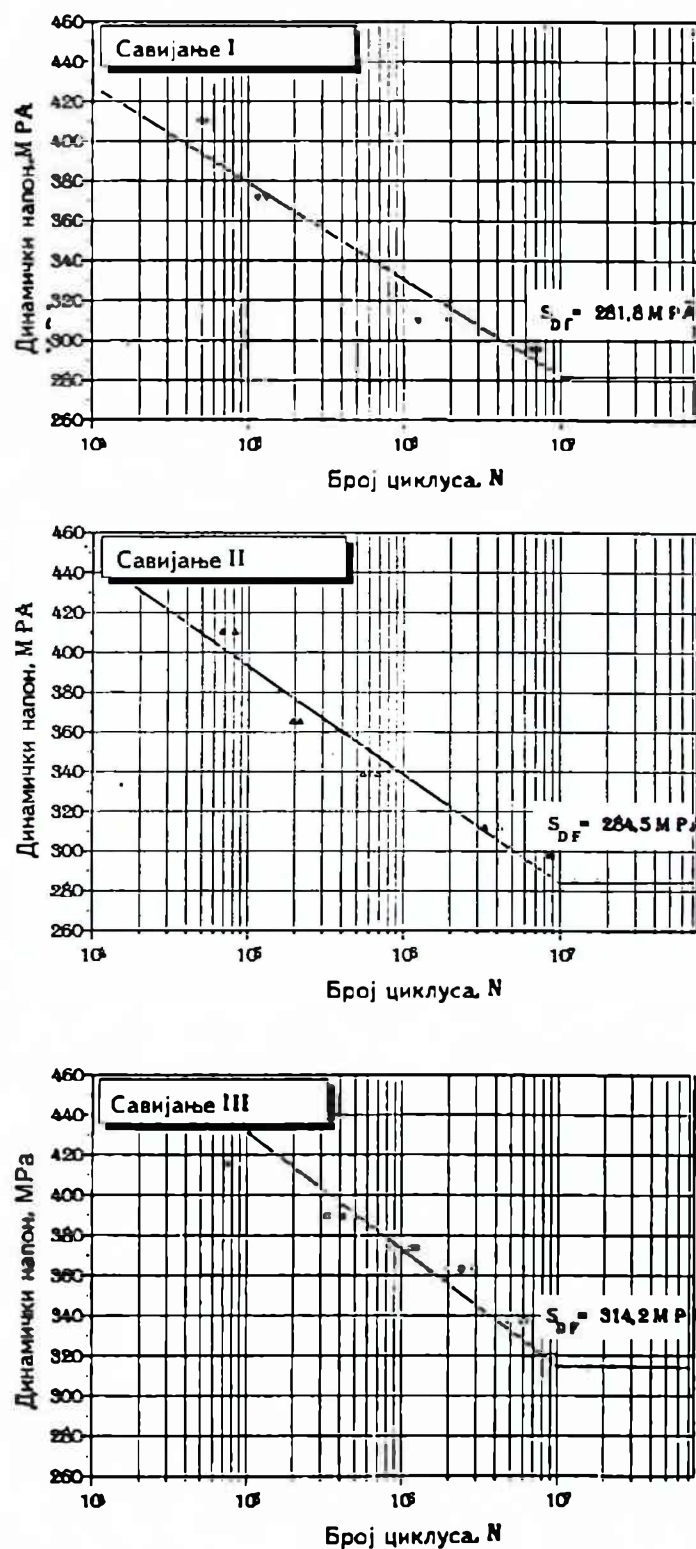
3.6.5.3 Механичке особине при динамичком дејству силе

Испитивања чврстоће на замор савијањем у три тачке оригиналних шипки свих шест серија карактерише се нехомогеним спољашњим оптерећењем са максималним затезним напоном на површини шипке. Како је и аксијални (затезни) напон максималан на површини, то такви услови представљају најнеповољнији случај спољашњег оптерећења у посматраном моделу заосталих напона. Изабрани случај симетричног (притисак - затезања) оптерећења са хомогеним напоном по попречном пресеку треба да омогући компарацију са овим веома широко коришћеним поступком испитивања. Резултати првог теста приказани на сликама 3.59 и 3.60 показују да је чврстоћа на замор највећа код највећег степена редукције пресека (значи, највећег ефекта деформационог ојачавања). Разлика од 30 МПа између серије I и II је највећа између испитиваних серија. Код серија II и III разлика је смањена на мање од 5 МПа и може бити последица смањеног ојачавања које је наглашено код статичког затезања. Како је квалитет површине у свим случајевима исти, то је ефекат деформационог ојачавања доминантан у односу на утицај заосталих напона у шипкама.

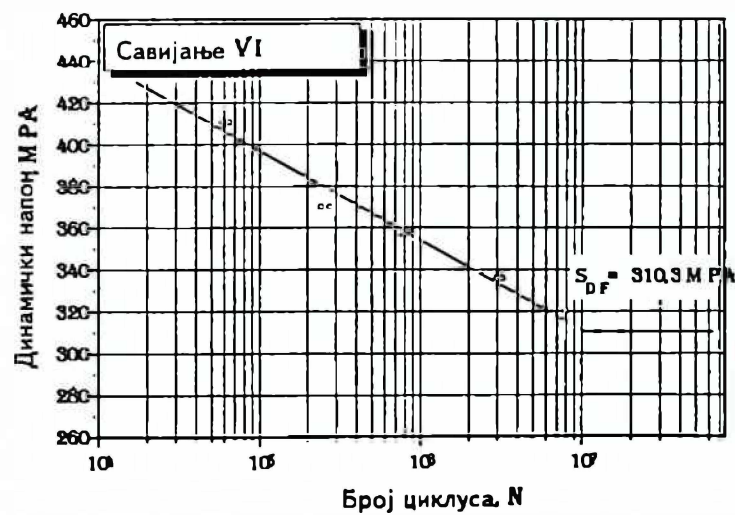
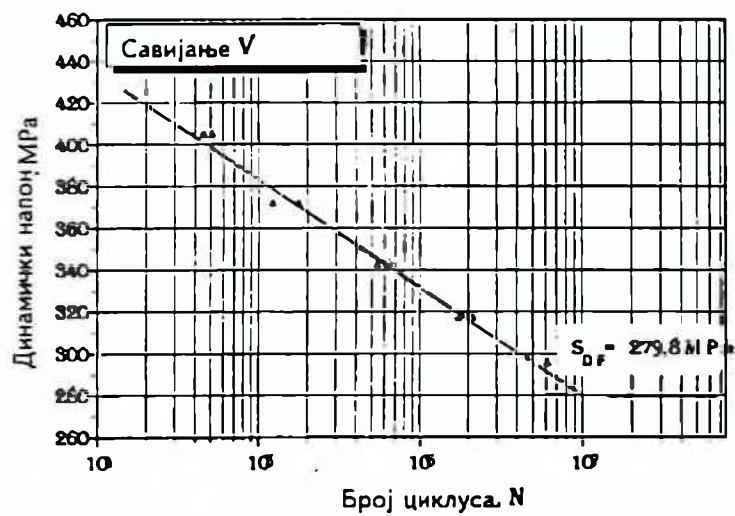
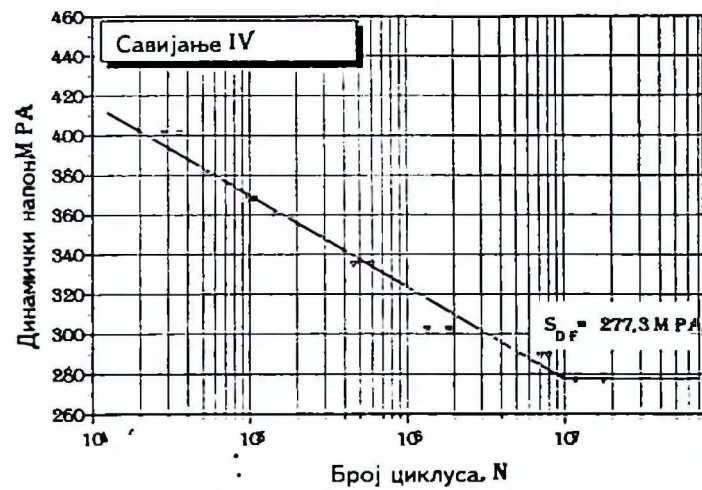
Равнање је изазвало такође веома малу промену (< 5 МПа) код заморне чврстоће. Промена ($< 1,6\%$) представља ефекат који је настао на рачун заосталих напона при њиховој максималној промени на површини шипки, укључујући ту и промену знака напона. (Ниже вредности су због нижег ефективног напона.)

Резултати другог дела тест испитивања на замор, односно добијене вредности трајне чврстоће су дати на слици 3.61. Добијена заморна чврстоћа од 293,6 МПа је мања од чврстоће код савијања која износи 314,2 МПа, што значи да већи утицај показује дејство хомогеног напона на комплетни попречни пресек од нехомогеног напона са високом амплитудом на површини. Ако се упореде

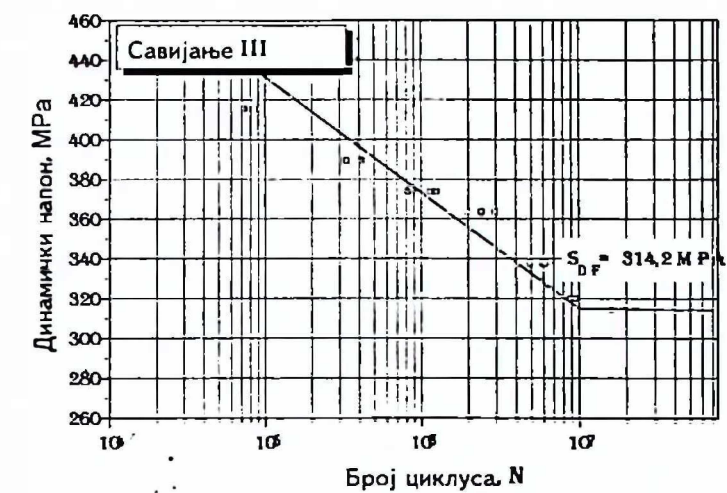
результати савијања за вучено и равнато стање (као два стања са различитим моделом заосталих напона) са резултатима затезање/притисак за вучено стање, онда је јасно да је утицај модела напона уопштено мањи од утицаја типа спољашњег оптерећења. Ово показују S – N дијаграми на слици 3.61.



Слика 3.59 - S - N дијаграми вучених узорака при испитивању савијањем у три тачке



Слика 3.60 - S - N дијаграми равнатих узорака при испитивању савијањем у три тачке



3.6.6 Уклањање заосталих напона

У теоријском делу рада посебно су издвојени и описани издвојени термички и механички поступци уклањања (релаксације, разградње) заосталих напона. У првом случају се ради о иницирању термички активних процеса који се могу описати одговарајућим релацијама, при чему се параметри (температура и време), усклађују са стањем материјала и стањем напона, односно доминантним механизмом одвијања процеса.

Обимна литература (кинетика и механизам термички активних процеса су детаљно испитани, пошто представљају основу структурних промена свих значајних поступака завршне прераде) омогућава да се систематизују утицајни параметри код практично свих завршних поступака и одреде температурни интервали (кинетичке величине) код уклањања заосталих напона.

Механизам "реакција" које доводе до разградње заосталих напона се може извести на основу Зенер-Аврамове функције у којој бројне вредности коефицијената уз температуру и време могу да упуте на познате промене у структури материјала. Тако је у свим случајевима добијена практично иста вредност коефицијента нагиба линеаризоване Зенер-Аврамове функције, и то независно од температуре, што (с обзиром на значење нагиба) упућује на то да је доминантан механизам уклањања заосталих напона, такође, независан од температуре.

Како се облик промене може приказати једначином $\tau = \tau_0 \cdot \exp(-Q/kT)$, то је тако одређена енергија активације допунска величина за препознавање термичких реакција које су неопходне за релаксацију (разградњу) напонског стања. Реакције које се одвијају при разградњи нагомилане енергије у кристалу су: кретање празнина, кретање дислокација, успињање дислокација и орјентисане су на дифузију у кристалима. Тако одређена активациона енергија није у свим случајевима омогућила прецизно раздвајање доминантног процеса иако је он директно везан са дислокацијама у области температура испод температуре рекристализације. Познато је да је тада лимитирајући процес термички активног успињања дислокација са енергијом активације једнакој енергији самодифузије (када се нагомилана еластична енергија доминантно уклања запреминском дифузијом).

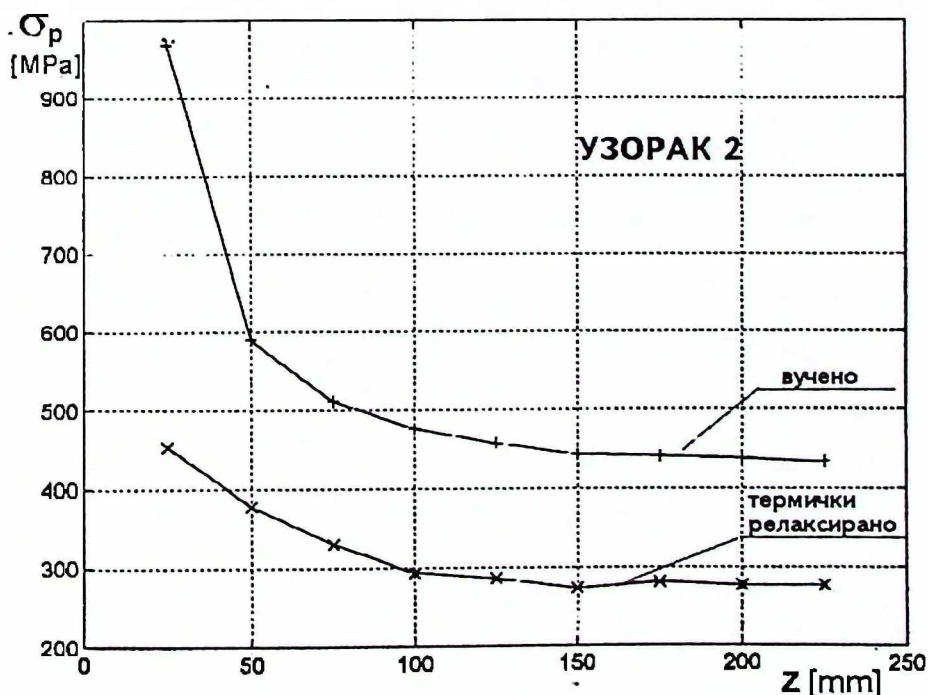
На основу тога је и циљ рада у овој области орјентисан на проверу могућности прецизног предвиђања услова термичког уклањања заосталих напона, тј. одређивања температура на којој се вредности заосталих напона смањују на половину своје вредности. Тако је за пробни вучени узорак пречника 15 mm од челика Č.4121 (вучење са Φ 16 на Φ 15 mm) изабрана температура од 370°C. Добијени резултати за промену угиба дуж отвора шипке су приказани у табели 3.20, и показују да је за 46 % смањена вредност угиба из чега произлази и једнака промена заосталих напона. У наставку су спроведена допунска испитивања за пречнике вучених узорака од 30 и 40 mm, па је температура жарења повећана на 390°C. Време потребно за прогревавање је одређено експериментално за сваки пречник. Међутим, у самом експерименту сви су узорци унешени у пећ заједно, а контролисана је температуре атмосфере у пећи. То је довело до измене температурног режима, те су се претходно одређена времена потребна за појединачно прогревавање показала недовољним. Због тога се за поуздану прогнозу може узети само пробни узорак, док ће се резултати осталог програма испитивања анализирати на основу карактеристичних односа у зависности од планираних испитивања утицајних параметара. Комплетни резултати за еластичну линију су приказани у табели 3.6, а карактеристични случајеви на сликама 3.62 и 3.63. Апроксимација еластичне линије се код жареног стања у односу на вучено стање разликује само по коефицијентима (слика 3.17 ÷ 3.27), па су и напони на површини прорачунати по истим релацијама. Резултати прорачуна су приказани у табели 3.10.

Табела 3.20 Еластичне линије за вучени и термички релаксирани узорак

Č.4121	Вучење:		Φ16 → Φ15		Мазиво:		уље		Брзина:		0,35 m/s	
ПОМАК	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
РАЗМАК Почетно	0	0,58	1,98	4,02	6,56	9,82	13,78	17,96	22,90	28,34	34,38	
Жарено 1h - 370 C	0	0,30	1,00	2,20	3,50	5,06	7,30	9,70	12,36	15,38	18,78	

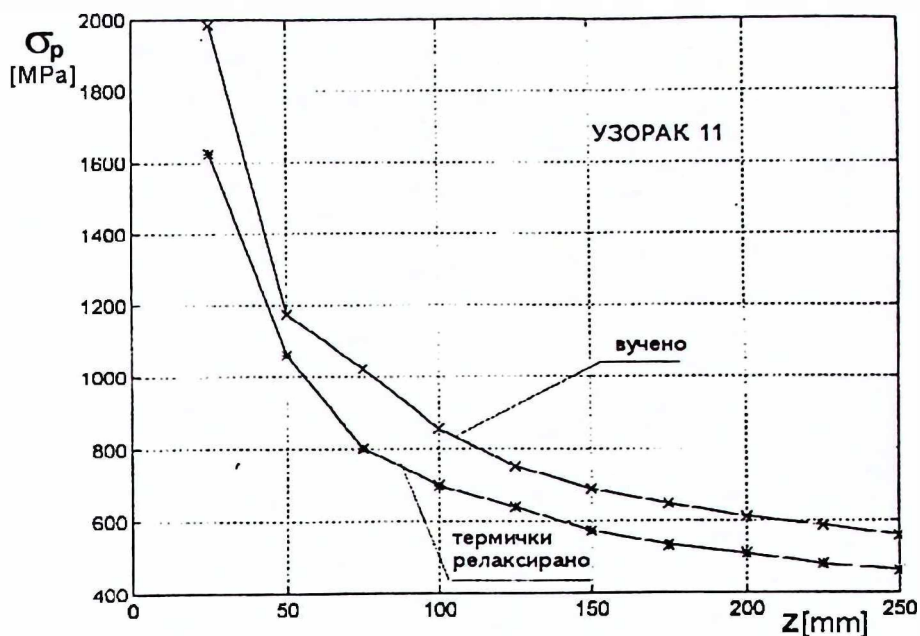
Упоредни дијаграм напона за вучено и термички третирано стање код узорка 2 показује да је ефекат термичког третмана препознатљив по континуираном смањењу напона дуж еластичне линије, слика 3.62. Исто тако, примећује се смањење утицаја заковичног споја, што је у складу са анализираним повећаном нестабилношћу изазвано стањем и вредностима напона. Обе ове карактеристике афирмишу примењену методу за анализу релаксације заосталих напона.

Ефекти релаксације по подацима из табеле 3.10 су $\approx 36\%$ код пречника 15 mm; $22 \div 27\%$ код пречника 30mm и $\approx 17\%$ код пречника 40 mm, а представљају резултат недовршеног процеса термичке релаксације. Понашање заковичног споја код већег пречника је истокао код вучених стања, што значи да је интензивније смањење његовог утицаја могуће очекивати тек у области већег смањења заосталих напона. Ово показују и дијаграми на слици 3.63 за узорак 11.



Слика 3.62 - Упоређење прорачунатих вредности напона на површини у вученом и термички релаксираним стањима за узорак 2





Слика 3.63 - Упоређење прорачунатих вредности напона на површини у вученом и термички релаксираном стању за узорак 11

На основу резултата за пречник од 30 mm може се закључити да је ефекат смањења 22÷27 % изазван разликама хемијског састава (материјала) за дату групу челика.

Пошто се, значи, термичко уклањање заосталих напона насталих у процесу вучења може коректно описати помоћу поменутих релација, то је и тачност прецизирања бројних вредности задовољавајућа.

Механички поступак релаксације је једнако значајан за вучене шипке. У том смислу, од две варијанте у овим испитивањима изабрано је наизменично савијање са површинским сабијањем хиперболичним ваљцима. Ефекат таквог процеса је дат и анализиран у делу резултата мерења заосталих напона рентгенском дифракцијом.

Обзиром да се механичка релаксација напона може квантификовати и на основу модела утицаја заосталих напона на механичке особине, то се полазећи од такве анализе може употпунити слика, те оценити преферентност термичког или механичког третмана у односу на основне захтеве код шипкастих материјала.

3.6.7 Симулација савијања применом методе коначних елемената

Модел савијања половина шипки код одређивања аксијалних заосталих напона је приказан као оптерећење еквивалентним спрегом спољашњих сила на чеону површину, слика 3.37а. Такав модел се може применити и за симулацију дејства спољашњег оптерећења и проверу његовог ефекта на напонско-деформационо стање. У том смислу је издвојена еквивалентна конзола са следећим карактеристикама:

- Спрегнуте силе имају супротан смер (у односу на слику 3.37а) обзиром да се ради о спољашњем оптерећењу које треба да производи исту

- еластичну линију као унутрашње (које потиче од заосталих напон);
- Положај осе нерастављеног заковичног споја на узорку треба да буде поистовећен са укљештењем конзоле.

Симулација је извршена са три узорка за које су полазни подаци приказани на табели 3.21. Коришћен је програм ALGOR са 2990 чворова; број елемената: 2250 четвоространих призми, 450 тространих прилагођених осној симетрији полуцилиндричног модела узорка и са три степена слободе у сваком чвору.

Табела 3.21 Експериментални подаци за еластичне линије узорка 4,8 и 10

УЗОРАК	Материјал		Φ_o [mm]		Φ_v [mm]		<u>E [GPa]</u>		ν		БВ [m/s]	
4	Č.1221		16		14		191,4		0,33		0,35	
z [mm]	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
y [mm]	0,00	0,18	0,51	1,07	1,80	2,85	3,70	5,54	7,15	9,05	11,10	
УЗОРАК	Материјал		Φ_o [mm]		Φ_v [mm]		<u>E [GPa]</u>		ν		БВ [m/s]	
8	Č.1221		32		30		197,5		0,33		0,35	
z [mm]	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
y [mm]	0,0	0,30	0,59	0,95	1,56	2,21	2,95	3,83	4,82	5,90	7,10	
УЗОРАК	Материјал		Φ_o [mm]		Φ_v [mm]		<u>E [GPa]</u>		ν		БВ [m/s]	
10	Č.4121		42		40		214		0,33		0,35	
z [mm]	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	
y [mm]	0,0	0,30	0,55	0,90	1,45	2,00	2,55	3,45	4,33	5,25	6,25	

Симулација омогућава да се добију:

- поља вредности компоненти тензора напона на просторном моделу узорка;
- поља вредности померања на контролисаној дужини модела у (y – z) равни.

Ови резултати за узорак 10 су приказани на сликама 3.64 и 3.65. Компоненте тензора напона на моделу дужине 130 mm, почев од укљештења, имају следеће карактеристике:

- нормални напон σ_{xx} и σ_{yy} , као и све три компоненте тангенцијалних напона σ_{xy} ; σ_{yz} ; σ_{zx} практично су једнаки нули на комплетној дужини модела, изузев у непосредној близини укљештења (заковичног споја), слике 3.64 и 3.65,
- нормални напон σ_{zz} има линеарну дистрибуцију на попречном пресеку. Сагласно таквој дистрибуцији, односно уравнотежењу, његове највеће вредности су на темену цилиндричне површине, слика 3.65,
- ефективни напон прорачунат по релацији Мизеса практично је једнак интензитету нормалног напона σ_{zz} .

Моделно спољашње оптерећење које формира тензор напона са наведеним карактеристикама изазива савијање у (y – z) равни сагласно слици 3.66а.

Нијансирана трака показује да се настала померања у потпуности поклапају са измереним вредностима угиба из табеле 3.18.

Добијени резултати код остала два узорка у потпуности задржавају наведене карактеристике, па су овде приказани само нормални напони σ_{zz} , упоредо са ефективним напоном по Мизесу, слика 3.67, и модели померања, слика 3.66б и 3.66в.

Коришћење оваквог статичког модела за симулацију испуњава потребан услов константног моментног оптерећења, односно константан напон σ_{zz} по дужини модела. Ради детаљније анализе назначених разлика на месту укљештења симулирано је његово оптерећење, а резултати симулације за узорак 10 су приказани на сликама 3.68. Овде се уочава присуство компоненти тангенцијалних напона σ_{xy} , σ_{yz} , σ_{zx} на деловима цилиндричне површине и на прелазу у меридијалну раван и то тако да су оптерећени делови постављени симетрично у односу на теме цилиндричне површине. Напони на цилиндричној површини су негативни, а на меридијалној - позитивни. Највеће позитивне вредности напон σ_{yz} су у околини подужне осе.

Нормални напони σ_{xx} и σ_{yy} имају идентичну расподелу и незнатне разлике бројних вредности на темену цилиндричне површине, слика 3.68. Расподела треће компоненте нормалног напона σ_{zz} је такође блиска расподели остале две, али са знатно већим вредностима. Резултат оваквог напонског стања је да ефективни напон на попречном пресеку има широке области веома ниских вредности изван самог језгра.

Значајан показатељ симулације, осим наведених, су и бројне вредности напона σ_{zz} на темену цилиндричне површине. Ови подаци су приказани, упоредо са прорачунатим вредностима аксијалних заосталих напона, у табели 3.22.

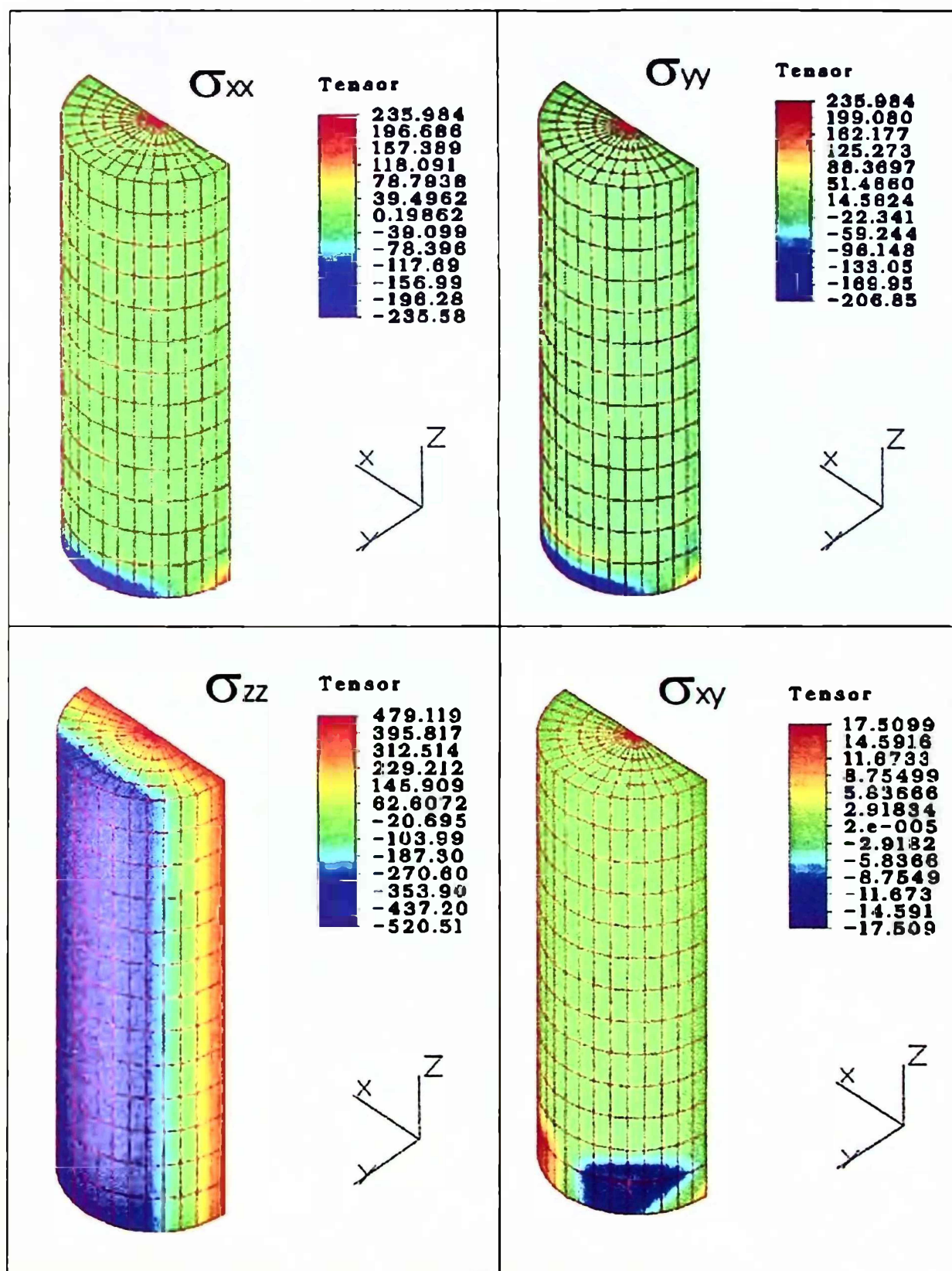
Разлика вредности σ_{zz} и σ_z је најмања код узорка 4 износи 3,8 %, док је код узорка 8 она 8,2 %, а код узорка 10 - 7,5 %. Избор узорака је такав да обухвата најмање, средње и практично највеће вредности напона, по подацима из табеле 3.10, па је и оцена наведених разлика комплетна у односу на димензије шипке и област добијених напона.

Добијена подударност резултата за напоне на површини је сасвим задовољавајућа чиме је потврђена могућност симулације по одабраном моделу методом коначних елемената за одређивање еластичне линије и највећег заосталог напона на површини узорка са напред наведеном грешком.

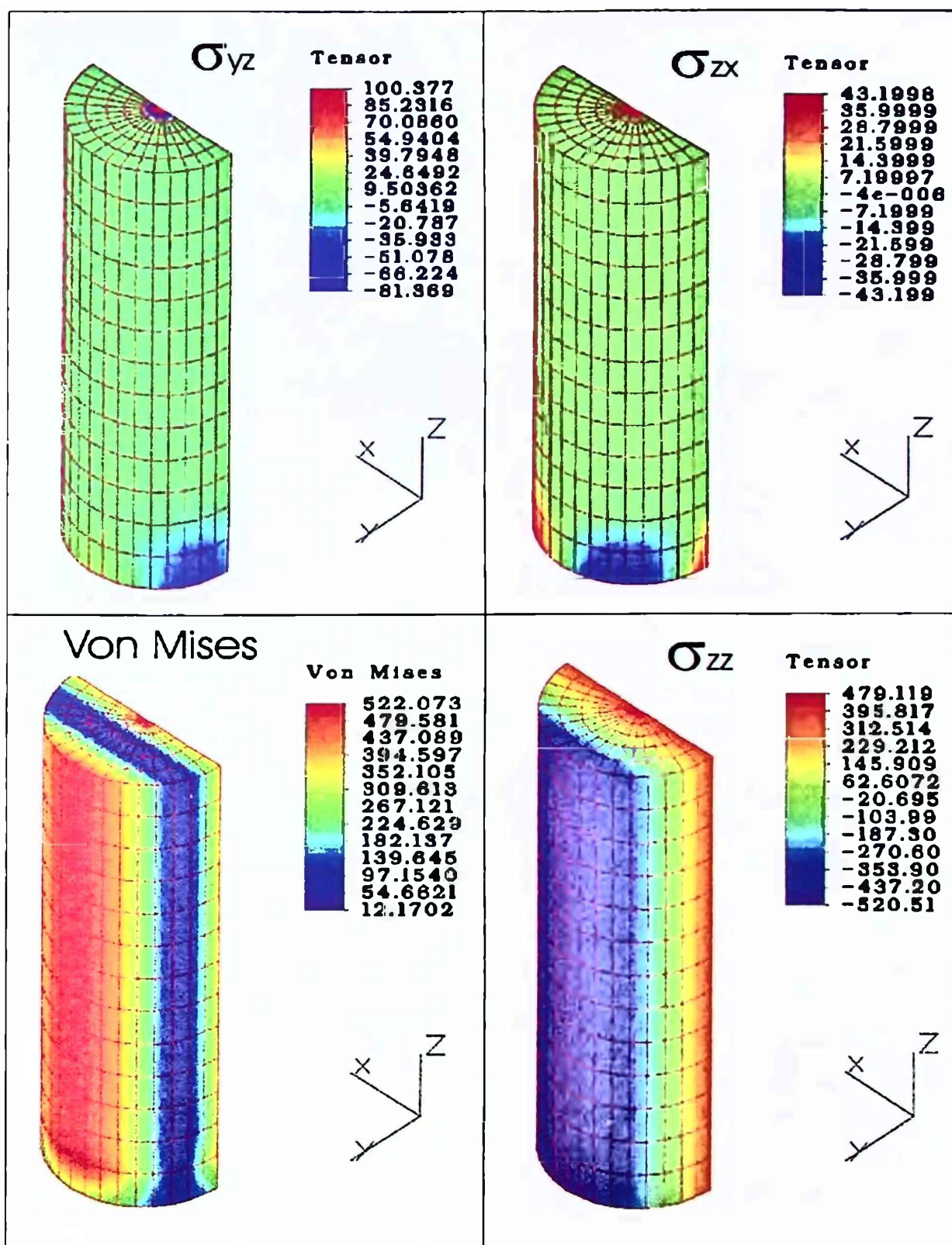
Табела 3.22 Упоређење максималних напона σ_{zz} и аксијалних заосталих напона σ_z^* на површини шипке

	Узорак 4	Узорак 8	Узорак 10
σ_{zz} [MPa]	296,0	404,8	520,5
σ_z^* [MPa]	307,1	438,0	595,3

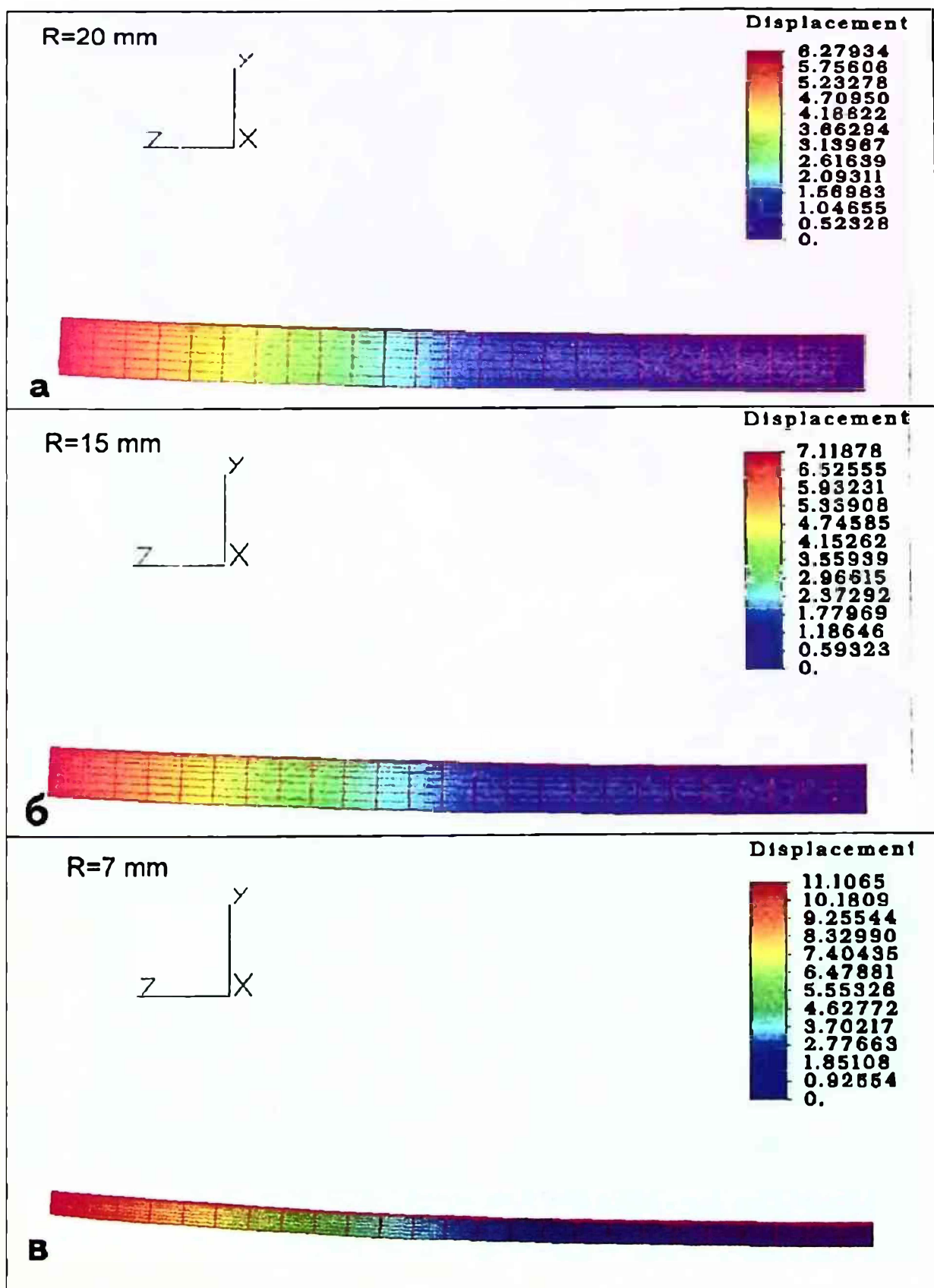
* Вредности напона σ_z^* су прорачунате на основу еластичне линије по моделу Б за 250 mm и оне се разликују од вредности датих у табели 3.10 за помак 225 mm.



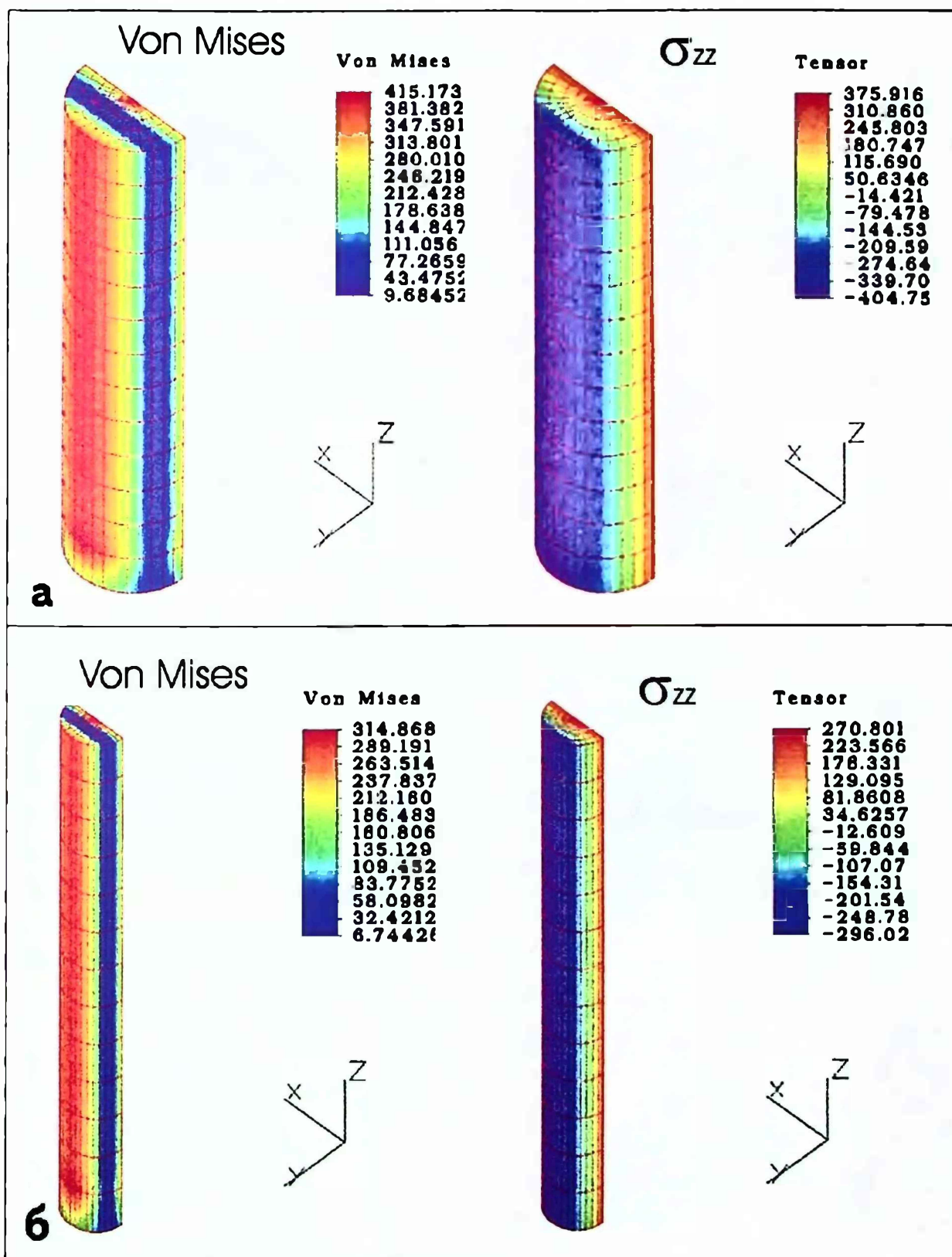
Слика 3.64 - Компоненте тензора напона код симулације савијања за узорак 10



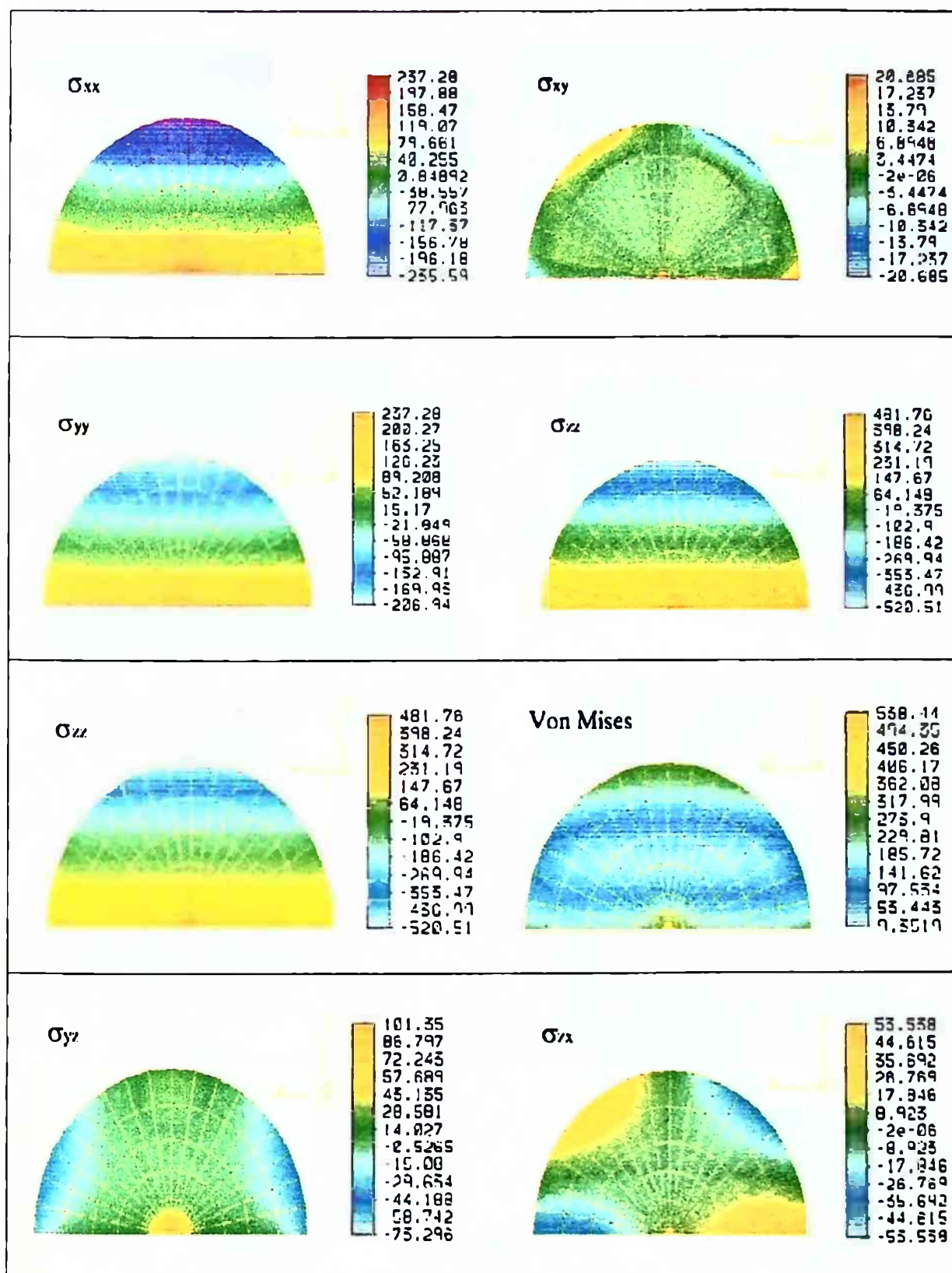
Слика 3.65 - Компоненте тензора напона и упоређење аксијалног напона са ефективним напоном по Мизесу код симулације савијања за узорак 10



Слика 3.66 - Резултати симулације померања за узорке број 10 (a), 8 (6) и 4 (B)



Слика 3.67 - Упоредне вредности симулираних ефективних напона по Мизесу и аксијалних напона за узорак 8 (а) и узорак 4 (б)



Слика 3.68 - Компоненте тензора напона и упоређење са ефективним напоном по Мизесу за пресек $z = 0$ (на месту укљештења)



3.6.8 Упоређење резултата за аксијалне заостале напоне и вучни напон

Резултати добијени за аксијалне заостале напоне и вучни напон су упоредно приказани у табели 3.23. Уједно су приказани резултати за механичке особине $R_{p0.2}$ и R_m .

Резултати за заостале напоне добијени применом две методе (узорци 1,3 и 4) показују да се дифракцијом могу добити веће вредности, и то два пута (узорак 4). Разлике код остала два узорка су знатно мање и толерантне (у односу на уопштenu тачност методе).

Вучни напон је довољно низак у поређењу са границом течења тако да је процес вучења стабилан.

Аксијални заостали напони су већи од границе течења, па чак и од затезне чврстоће код шипки пречника 40 mm. Код шипки пречника 30 mm, сумарни (аксијални заостали и напон вучења) је близак или већи од границе течења. Слично је и код шипки најнижег пречника и аксијалних напона добијених методом дифракције, док је са резултатима добијеним дифлекцијом уочљива разлика границе течења и збира вучног и заосталог напона. Према је за поуздану корелацију потребна допунска провера, изнесени подаци могу са наведеним односима вучног напона и границе течења, односно затезне чврстоће, послужити за приближно одређивање заосталих напона.

Табела 3.23 Упоредне вредности аксијалних заосталих напона, вучног напона и механичких особина $R_{p0.2}$ и R_m

Узорак	Вучна сила [kN]	Вучни напон [MPa]	Аксијални заостали напони на површини		Механичке особине	
			Дифракција [MPa]	Дифлекција [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]
1	23,2	131,4	520	446,7	639,6	656,9
3	-	-	360	338,1	668,8	684,6
4	30,4	197,6	640	307,8	732,7	741,4
5	98,8	139,8	-	663,4	621,3	667,2
6	107,7	152,5	-	465,0	585,9	619,1
8	88,0	124,6	-	450,9	562,8	568,8
9	110,4	156,3	-	508,6	598,7	633,7
10	137,6	109,6	-	573,5	528,7	536,9
11	140,8	112,1	-	585,7	541,5	550,3

4. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

У раду су приказани резултати истраживања узрока настанка, знака и вредности заосталих напона у процесу вучења шипки, промене у накнадним завршним поступцима код којих се смањују, редистрибуирају или уклањају заостали напони, као и корелација различитих модела напона и механичких особина челичних шипки. Примењени обим истраживања, добијени резултати и анализа омогућавају да се изведу следећи закључци:

- Пластично течење код вучења је нехомогено и ствара услове за осносиметрична стања заосталих напона. Карактеристике нехомогеног течења су квантитативно приказане релативним показатељем нехомогености који је за корелацију са заосталим напонима одређен у односу на очекивани неутрални пресек. Тако је показано да су реални услови за настанак:
 - аксијалних заосталих напона који су на површини затезни, на оси притисни и линеарно се мењају између површине и осе;
 - радијалних напона са максимумом у оси и нелинеарним смањењем до нуле на површини;
 - обимних напона који су слични аксијалним на површини и оси, али се нелинеарно мењају између површине и осе.
- Добијене вредности заосталих напона одређени на површини методом рентгенске дифракције крећу су у интервалима: $260 \div 640$ МПа за аксијалне, $-(1030 \div 150)$ МПа за радијалне и $-940 \div 300$ МПа за обимне напоне. Према су физички предуслови за примену методе такви да је грешка мерења до ± 150 МПа, доказано је да:
 - све компоненте напона имају највеће апсолутне вредности (из издвојених интервала) код вученог стања. При томе аксијални напони су затезни, а остале две компоненте притисне,
 - напони настали вучењем се мењају у поступцима равнања и машинске обраде стругањем. Код равнања аксијални напони мењају знак прелазећи у притисне, док остала два остају притисна. Уз то, и вредности сва три напона се знатно смањују. Код обраде стругањем долази до изразитог смањења радијалних и аксијалних напона (њихове практичне елиминације), док се обимни напони повећавају.
- Истраживању заосталих напона је посвећена посебна пажња због њиховог првенственог значаја за стабилност дугачких елемената. У том циљу је развијен сопствени метод дифлекције заснован на доказаној корелацији нехомогеног течења и заосталих напона, и практично спроведен коришћењем могућности прецизног праћења нарушавања равнотеже "састављених" узорака. Резултати добијени применом ове методе су омогућили да се:
 - изведе поуздана математичка једначина еластичне линије у облику

$$y = a_2 z_n + a_3 z_n^2,$$

која, са два коефицијента a_2 и a_3 уз линеарни и квадратни члан релативне дужине (z_n), може да се примени у свим случајевима када се нарушава равнотежа формираних заосталих напона,

- коригује једначина еластичне линије са чланом $(k_1 + k_2 r)$ уместо коефицијента a_1 и преведе на облик

$$y = a_2 z_n + (k_1 + k_2 r) \cdot z_n^2$$

за поуздан опис промене еластичне линије изазване машинском обрадом стругањем шипки са формираним заосталим напонима до полупречника r ,

- изврши анализа и потврди примењивост једначине Зенер-Аврама за опис релаксације напона термичким третманом.
- Теоријски су изведене уопштене једначине:
 - за прорачун аксијалних заосталих напона на површини у облику

$$\sigma_p = \frac{9\pi^2 - 64}{24\pi} \cdot (3 + n) \cdot R_0 \cdot \frac{f}{L^2}$$

у којој је уведена променљива n као степен параболе која описује дистрибуције напона по попречном пресеку. Прорачунате вредности аксијалних заосталих напона код изабраних узорака са полупречником R_0 , модулом еластичности E и угибом f на дужини L су, за $n=1$, у интервалу 300 ÷ 670 МПа,

- дистрибуције аксијалних напона по попречном пресеку у облику

$$\sigma_{zn} = \sigma_p \left[\left(1 + \frac{2}{n} \right) r_n^n - \frac{2}{n} \right]$$

који омогућава одређивање аксијалних заосталих напона на основу напона на површини σ_p и задатог типа једначине (параболе n -тог реда за променљиви релативни полупречник $r_n = r/R_0$),

- редистрибуције заосталих напона на површини у облику:

$$\frac{\sigma_{p,n}}{\sigma_{pv}} = \prod_{i=1}^n \left[\frac{R_v - (i+2) \Delta}{R_v - (i-1) \Delta} \right]$$

на основу којег се може прорачунати релативна промена напона на површини после сваког пролаза којим се смањује вучени полупречник r_v за дебљину скинутог слоја при једном пролазу (Δ). Једначина је изведена за линеарну дистрибуцију напона σ_z и експериментално је потврђена.

- Изабране методе су пружице увид у настанак, знак и вредности заосталих напона, а издвојене једначине омогућавају да се квантитативно предвиђају промене заосталих напона које прате завршну дораду елемената са формираним заосталим напонима. Такође, појединачне вредности компоненти заосталих напона које су измерене на површини, омогућавају примену методе коначних елемената за поуздану симулацију напонско-деформационих стања као последице дејства заосталих напона.
- Корелација модела заосталих напона са механичким особинама је показала:

- незнатан утицај пречника епрувете добијене из елемената са заосталим напонима на механичке особине. То практично значи да услови редистрибуције изворног стања заосталих напона омогућавају примену стандардних епрувета као референтних, за испитивања затезањем код елемената са заосталим напонима насталих у процесу вучења,
- да се механичке особине при равнању мењају тако да су затезне карактеристике смањене доминантно у интервалу $4 \div 13\%$, а у сваком случају испод 19% ,
- ефекат заосталих напона је занемарљив у поређењу са Баушингеровим ефектом код промена механичких особина,
- при динамичком дејству силе заостали напони утичу знатно мање у односу на статичо дејство пошто су разлике код оригиналних зорака са различитим заосталим напонима испод $1,6\%$,
- знатно већи утицај на механичке особине, од стања заосталих напона, односно модела њихове дистрибуције, имају основне особине материјала, деформационо ојачавање и тип оптерећења. За тачну анализу утицаја сваког од њих се захтева познавање законитости њиховог утицаја и прецизна контрола њихове промене. Сам утицај заосталих напона, због тога, ће умногоме зависити од остварене тачности при одређивању промене ових фактора. Међутим, уопштено, утицај заосталих напона се може повезати са ефектом опорављања, односно заосталом еластичном енергијом која износи $8 \div 10\%$ укупне енергије потребне за деформацију.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] A.Macherauch, H.Wohlfahrt, U.Wolfstug, HTM 28, (1973), 201.
- [2] A.Bacymanski et al., Study of Second Order Stresses for Single and Two Phase and Polycrystalline Materials, ICRS-5, Linkoping, (1997), Proc., 208-214.
- [3] V.Hauk, "Eigenspannungen, Entstehung-Messung-Bewertung, Vortagstexte eines Symposium, Deutsche Gesellschaft fur Metallkunde e.v., Band 1, (1983)
- [4] M.R.Saoubi et al., Residual stresses and Texture Analysis and Machined Surfaces of AISI 316L Steels, ICRS-5, Linkoping, (1997), Proc., 349-355.
- [5] P.Vomacka, H.Walburger, Shot Peening of a Hardened Steel. Effects of Tempering temperature, Hard Machining and Shot Peening Parameters on Induced Residual Stresses, ICRS-5, Linkoping, (1997), Proc., 88-95.
- [6] W.L.Roberts, "Cold Rolling of Steel", Marced Dekker inc, New York and Basel (1978). pp.661-664.
- [7] H.G.Kuhne und U.Fischer, Neue Hutte, (1975), Heft 11, 656-658.
- [8] O.Pawelski, W.Rasp und J.Rieckmann, Stahl und Eisen (1989) Nr 20, 967-975;
- [9] A Takimoto, Effects on Forming and Deformation under Tension on X-Ray on Residual Stresses of a SUS301 Stainless Steel Sheet, ECRS-4, Cluny, (1996), Proc., 1023-1033.
- [10] M.Shamshirsaz, Residual Stresses in Metalic Sanwich Sheet, ECRS-4, Cluny, (1996), Proc., 805-815.
- [11] K.Inal et al., I and II Order Stresses in a Duplex Stainless Steel During Elastic and Plastic Loading, X-Ray Diffraction Experimental Study and Self Cinsistent Modelling ECRS-4, Cluny, (1996), Proc., 853-863.
- [12] D.Chaufman and V.Hauk, Stresses in the Matrix of Reinforced Polyetherketone (PEK), ECRS-4, Cluny, (1996), Proc., 891-901.
- [13] M.Watts et al., X-Ray Diffraction and Neutron Diffraction Measurement of Micro and Macro stresses in Metal Matrix Composites, ECRS-4, Cluny, (1996), Proc., 951-961.
- [14] Homogenous Micro stresses Caused by Heat and Deformation, some examples, ECRS-4, Cluny, (1996), Proc., 981-989.
- [15] P.F.Williemse, B.P.Naughton, Mater. Sci. and Techn., (1985), 1, 41-44;
- [16] N.W.Bonner, Residual Stresses in Multi-pass Cold Drawing of High Carbon Steel Wire, ECRS-4, Cluny, (1996), Proc., 755-765.
- [17] C.S.Hartley, M.Dehghani, Residual stresses in axisymmetrically formed products, "Advanced Technology of Plasticity", (1986), Vol I, 605-611.
- [18] T.Coppola et al., Evaluation of Stresses in Cold Drawn Tubes, ECRS-4, Cluny, (1996), Proc., 475-485.
- [19] E.Doege und F.Weber, Stahl und Eisen (1991), Nr.6, 85-88.

- [20] I.L.Perlin, M.Z.Ermanok, "Teoriya voloceniya", Metallurgija, Moskva, (1971), 371-384.
- [21] A.W.Backofen, "Deformation Processing", Massachusets, Addison-Weslwy Publishing Processing Company, (1975), 157-175.
- [22] R.Koop, O.Pawelski, Dracht, 1979, 3, 104-110.
- [23] E.G.Thomsen, Ch.T.Yang, S.Kobayashi, "Mechanism of Plastic Deformation in Metal Process", London, The M^cMillan Company New York Cahhier-M^cMillan, (1968), 193-195.
- [24] M.Misovic, Doktorska Disertacija, (1988), Metalurski fakultet, Podgorica.
- [25] M.Misovic, P.Funke, M.Jacimovic, Metalurgija (1996), Broj 3, 169-179.
- [26] M.Misovic, M.Jacimovic, "Numerical Solution of Plasticity Problems of Some Stationary Processes, VIII Conference on Applied Mathematics, Tivat, May 27-29, (1993), 161-169.
- [27] M.Misovic, M.Jelic, M.Jacimovic, Metalurgija (1995), Broj 3, 241-251.
- [28] M.Jelic, M.Misovic, M.Jacimovic, The Flow Characteristics and Axial Residual Stresses in Drawn Steel Bars, ICRS-5, Linkoping, June 16-18 (1997), Proc., 268-275.
- [29] A.Peiter and H.Wern, Bander Bleche Rohre, (1989), 11, 18-26.
- [30] W.Reimers, Analysis of Residual Stresses Distributions Using Diffraction Methods, ECRS-4, Cluny, (1996), Proc., 33-59.
- [31] D.M.Vasiljev, Difraktsione metodi isledovaniya, M.Metalurgiya, (1977), p.248.
- [32] D.M.Vasiljev, Zavodskaya Laboratoriya, (1965), N^o 8, 972-978.
- [33] F.Cernuschi et al., A Comparison of Different Methods for the Calculation of the Stress-Free Lattice Interplanar Distance d^0 , ICRS-5, Linkoping, June 16-18 (1997), Proc., 829-833.
- [34] G.M.Swallowe et al., Peak Profile Analysis as a Measure of Substructural Evolution with Plastic Strain in Metals, ECRS-4, Cluny, (1996), Proc., 61-69.
- [35] M.Harting, Precise determinatin of Peak Positions in X-Ray Residual Stress Analysis, ECRS-4, Cluny, (1996), Proc., 97-107.
- [36] T.H. de Keijser et al., J.Appl.Cryst., (1982), 15, 309-314.
- [37] Fizitcheskie metodi isledovaniya, Zavodskaya laboratoriya, (1984), 21, 20-29.
- [38] M.R.James, J.B.Cohen, Treatise Material Science and Technology, (1980), vol.19, 1-62.
- [39] D.P.Koistinen, R.E.Marburger, Trans.ASM, (1959), vol.51, 537-555.
- [40] D.Kirk, Strain, (1971), vol.1, 7-14.
- [41] K.Nealey, Metals and Materials, March (1988), 144-145.
- [42] A.Peiter, Handbuch Spannungs Messpaxis, Wieweg, (1992), 98-108.
- [43] O.Vohringer, H.Wohlfahrt, "Eigenspanungen und Lastspanungen", C.Hanser Verlag, Munchen, (1982).
- [44] E.Macherauch, Z.f.Werstofftechnik, 10, (1979), 97.
- [45] E.Macherauch, In "Eigenspannungen", DGM, Oberursel, (1980), 41.
- [46] E.Macherauch, O.Voringer, Z.Werkstofftechnik 9, (1978) 370.
- [47] U.Wolfstieg, E.Macherauch, In "Eigenspannungen", DGM, Oberursel, (1980), 345.
- [48] H.Faber et al, Harterei-Tech. Mitt. 32, (1977), 153.

- [49] W.C.Leslie, The Physical Metallurgy of Steels, M^cGraw-Hill Book Comp., New York, (1981).
- [50] J.G.Byrne, Recovery, Recrystallization and Grain Growth, M^cMillan Comp., New York, (1965).
- [51] C.W.Marshall, R.E.Maringer, Dimensional Instability, Pergamon Press, New York, (1977).
- [52] D.A.Woodford, Mat. Sci. Eng. 15, (1974), 169.
- [53] A.Peiter, Z.Metallkunde 57, (1966).
- [54] A.Neubauer et al., Wiss. Z. d. TH Otto v Guericke, Magdeburg 20, (1976).
- [55] J.Ruge, Handbuch der Schwiestechnik, Springer-Verlag, Berlin, (1974).
- [56] R.S.Barker, J.G.Sutton, "Aluminium", Vol.III, ASM, Metals Park, Ohio, (1967).
- [57] W.Klein, Dr.-Ing. Dissertation, Universitat Karlsruhe, (1978).
- [58] R.Sautter, Diploarbeit, TH Stuttgart, (1965).
- [59] H.Hickel, Dr.-Ing. Dissertation, Universitat Karlsruhe, (1973).
- [60] H.Hickel et al., DVS-Bericht 26, Strachtech, VI, (1973), 53.
- [61] T.Hirsch, Dr.-Ing. Dissertation, Universitat Karlsruhe, (1983).
- [62] E.Macherauch, P.Mayr, Z. f. Werkstofftechn. 8, (1977), 213.
- [63] R.W.Herzberg, Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, J.Wiley, New York, (1976).
- [64] U.Martin et al., Microstructure Related Mechanisms of Related Stress Relaxation in Metals, ICRS-5, Linkoping, June 16-18 (1997), Proc., 1121-1127.



PODACI POTREBNI ZA DIGITALIZACIJU DOKTORSKE DISERTACIJE

Ime i prezime autora: Miloš Jelić

Godina rođenja: 1956.

E-mail: milos.jelic.56@gmail.com

Organizaciona jedinica Univerziteta Crne Gore: Metalurško-tehnološki fakultet

Naslov doktorske disertacije: ISTRAŽIVANJE ZAOSTALIH NAPONA U POSTUPCIMA ZAVRŠNE PRERADE I ZNAČAJ MODELA NJIHOVE DISTRIBUCIJE ZA IZBOR OSOBINA METALNIH MATERIJALA

Prevod naslova na engleski jezik: THE INVESTIGATION OF RESIDUAL STRESSES IN FINAL PRODUCTION PROCESSES AND THE IMPORTANCE OF THEIR DISTRIBUTION MODELS ON METAL PROPERTIES SELECTION

Datum odbrane: 28.12.1998.

Signatura u Univerzitetskoj biblioteci¹:

Naslov, sažeci, ključne riječi (priložiti dokument sa podacima potrebnim za unos doktorske disertacije u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore):

Izjava o korišćenju (priložiti potpisanu izjavu):

Napomena:

¹ Podatak o signaturi (lokaciji) može ispuniti biblioteka organizacione jedinice/Univerzitetska biblioteka

PODACI POTREBNI ZA UNOS DOKTORSKE DISERTACIJE U DIGITALNI ARHIV UNIVERZITETA CRNE GORE

Prevod naslova disertacije na engleski jezik:

THE INVESTIGATION OF RESIDUAL STRESSES IN FINAL PRODUCTION PROCESSES AND THE IMPORTANCE OF THEIR DISTRIBUTION MODELS ON METAL PROPERTIES SELECTION

Mentor i članovi komisija (za ocjenu i odbranu):

- 1) Prof. dr Mitar Mišović – mentor
- 2) Prof. dr Dragutin Drašković
- 3) Prof. dr Branislav Radonjić
- 4) Prof. dr Milošica Jaćimović
- 5) Prof. dr Zoran Čulafić

Sažetak²:

U radu su prikazani rezultati istraživanja zaostalih napona kod vučenih čeličnih šipki konstrukcionih čelika i njihovog uticaja na mehaničke karakteristike. Proučavani su uslovi deformacije kod vučenja i povezano nehomogeno plastično tečenje sa nastankom zaostalih napona. Praćeno je ponašanje nastalih napona u fazama naknadne dorade vučenih šipki i proveren uticaj zaostalih napona na mehaničke osobine.

Plastično tečenje kod vučenja stvara uslove za osnosimetrično naponsko stanje zaostalih napona. Relativni pokazatelj nehomogenosti je linearan sa promenljivim znakom kod aksijalnog, nelinearan i negativan kod radijalnog tečenja sa maksimumom u osi u oba slučaja.

Izmerene vrednosti na površini metodom rentgenske difrakcije su u intervalu od 260 do 640 MPa za aksijalnu, od -1030 do 150 MPa za radijalnu i od -940 do 300 MPa za obimnu komponentu. Aksijalni naponi određeni metodom difleksije su u intervalu 300 do 670 MPa.

Postupci naknadne obrade znatno menjaju zaostale napone izazivajući njihovu redistribuciju i smanjenje (mehanička obrada), odnosno uklanjanje (temička obrada – žarenje). Razvijeni modeli elastične linije i redistribucija napona kod postupaka mehaničke obrade, odnosno Zener-Avramova funkcija kod žarenja omogućavaju da se precizno kvantifikuju i kontrolišu promene zaostalih napona kod tih postupaka. Za to su potrebne polazne vrednosti napona, što je takođe dovoljan podatak za simulaciju efekata narušavanja ravnoteže zaostalih napona na osnovu izvedenih modela distribucije.

Uticaj zaostalih napona na mehaničke osobine je ograničen i kod statičkog i kod dinamičkog dejstva sile. Modeli izvornih i redistribuiranih napona utiču na mehaničke osobine u granicama uticaja oporavljanja.

Sažetak na engleskom (njemačkom ili francuskom) jeziku:

An investigation on residual stresses in drawn steel bars and their effects on mechanical properties is presented in this issue. Drawing deformation process has been analyzed in non-homogeneous plastic yielding has been correlated with residual stress formation. The behavior of residual stress when drawn bars are subjected to further production processes has been monitored and the effect on mechanical properties is evaluated.

Plastic yielding in drawing process creates conditions for axi-symmetrical residual stress field. The indicator of non-homogeneity rate is linear with both signs by axial yielding, non-linear and negative by radial yielding, both attaining the highest values at the axis.

Experimental stress values obtained on bar surface by X-Ray diffraction methods are in following ranges: 260 - 640 MPa for axial, (-1030) - 150 MPa for radial and (-940) – 300 MPa for hoop stresses, while experimental values for axial stresses by deflection method lie between 300 and 670 MPa.

Further production treatment influences residual stresses significantly causing their redistribution and reduction (machining) or their relaxation (heat treatment – annealing). Models of bar deflection lines and stress redistribution after machining as well as Zener-Avram function in heat treatment processes make stress evaluation possible and set residual stress change under control. This also enables simulation on the effect of residual stress balance disruption conforming the above models.

Static and dynamic tests showed that in both cases the influence of residual stresses on mechanical properties is not significant. Genuine bar specimens and ones with redistributed stresses have confirmed that residual stress effects do not exceed annealing effects.

² Ukoliko je predviđeni prostor za polja Sažetak, Sažetak na engleskom jeziku, Ključne riječi i Ključne riječi na engleskom jeziku nedovoljan, priložiti ih u posebnom prilogu.

Ključne riječi: zaostali naponi – komponente – uklanjanje – redistribucija, vučenje čelične šipke, rentgenska difrakcija, metoda difleksije, mehaničke osobine

Ključne riječi na engleskom jeziku: residual stresses – components – relaxation – redistribution, drawn steel bars, X-Ray diffraction, deflection method, mechanical properties

Naučna oblast/uža naučna oblast:

Prerada metala u plastičnom stanju

Naučna oblast/uža naučna oblast na engleskom jeziku:

Deformation processing

Ostali podaci:

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore unese doktorsku disertaciju pod naslovom

ISTRAŽIVANJE ZAOSTALIH NAPONA U POSTUPCIMA ZAVRŠNE PRERADE I ZNAČAJ MODELA NJIHOVE DISTRIBUCIJE ZA IZBOR OSOBINA METALNIH MATERIJALA

koja je moj autorski rad.

Doktorska disertacija, pohranjena u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore, može se koristiti pod uslovima definisanim licencom Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio/la³.

Autorstvo

Autorstvo – bez prerada

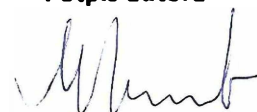
Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

Autorstvo – nekomercijalno ☒

Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada

Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima

Potpis autora



U Beogradu, 18.04.2022. godine

³ Odabrati (čekirati) jednu od šest ponuđenih licenci (kratak opis licenci dat je na poleđini ovog priloga)

Autorstvo

Licenca sa najširim obimom prava korišćenja. Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio).

Djelo se može koristiti i u komercijalne svrhe.

Autorstvo – bez prerada

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu.

Licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerade se moraju distribuirati pod istom ili sličnom licencom.

Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.

Autorstvo – nekomercijalno

Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio).

Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.

Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada

Licenca kojom se u najvećoj mjeri ograničavaju prava korišćenja djela. Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu.

Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.

Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima

Dozvoljava se umnožavanje, distribucija, javno saopštavanje i prerada djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerada se mora distribuirati pod istom ili sličnom licencom.

Djelo i prerade se ne mogu koristiti u komercijalne svrhe.