

# Anizotropno ponašanje toplo valjane trake tijekom hladne defromacije

---

**Skender, Filip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:909843>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-22**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Filip Skender

DIPLOMSKI RAD

Sisak, rujan 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Filip Skender

**ANIZOTROPNO PONAŠANJE TOPLO VALJANE TRAKE TIJEKOM  
HLADNE DEFOMACIJE**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: prof.dr.sc. Stoja Rešković  
Stručni voditelj: Tin Brlić mag.ing.met

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada:

Predsjednica: izv. prof. dr. sc. Ljerka Slokar Benić  
Član: prof. dr. sc. Stoja Rešković  
Član: doc. dr. sc. Ivan Jandrić  
Zamjenski član: doc. dr. sc. Jakov Baleta

Sisak, rujan 2020.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

◆ FAKULTETSKO VIJEĆE ◆

KLASA: 602-04/20-04/14

URBROJ: 2176-78/20-04-117

Sisak, 15. srpnja 2020.

Temeljem točke IX. Naputka o diplomskom radu i diplomskom ispitu Pravilnika o studiranju na preddiplomskim studijima i diplomskom studiju Metalurškog fakulteta i članka 23. Statuta Metalurškog fakulteta, Fakultetsko vijeće na svojoj 10. redovitoj sjednici od 15. srpnja 2020. (t. 3), a na prijedlog Povjerenstva za nastavu, donosi

## ODLUKU

### o odobravanju teme, imenovanju mentora i stručnog voditelja i Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada

#### I.

Studentu diplomskog sveučilišnog studija *Metalurgija* **FILIPU SKENDERU** (M-85/18) za mentoricu diplomskog rada pod naslovom "Anizotropno ponašanje toplo valjane trake tijekom hladne deformacije" ("Anisotropic Behavior of Hot Rolled Strip During Cold Deformation") imenuje se **prof.dr.sc. Stoja Rešković**, a za stručnog voditelja **Tin Brlić, mag.ing.met.**

#### II.

Studentu iz točke I. ove Odluke imenuje se Povjerenstvo za ocjenu i obranu diplomskog rada u sastavu:

1. izv.prof.dr.sc. Ljerka Slokar Benić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – predsjednica,
2. prof.dr.sc. Stoja Rešković, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – članica,
3. doc.dr.sc. Ivan Jandrić, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – član,
4. doc.dr.sc. Jakov Baleta, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet – zamjenski član.

#### III.

Ova Odluka stupa na snagu danom donošenja.

#### IV.

Protiv ove Odluke može se uložiti prigovor Fakultetskom vijeću Metalurškog fakulteta u roku 8 dana od dana primitka iste.

Obnašateljica dužnosti dekana  
Metalurškog fakulteta

  
izv.prof.dr.sc. Zdenka Zovko Brodarac

#### Dostavljeno:

- 1 x Filip Skender
- 5 x mentor, stručni voditelj, članovi Povjerenstva
- 1 x Studentska referada
- 1 x Tajništvo
- 1 x pismohrana Fakultetskog vijeća
- 1 x pismohrana

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

## IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj završni / diplomski / doktorski rad pod naslovom:

ANIZOTROPNO PONAŠANJE TOPLO VALJANE TRAKE

---


TIJEKOM HLADNE DEFORMACIJE

---

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, 17.09.2020

---



---

(vlastoručni potpis)

---

*Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.*

Ovaj rad je financirala Hrvatska zaklada za znanost projektom HRZZ IP-2016-06-1270 „Istraživanja početka plastičnog toka metala kod hladne deformacije“ . Voditelj projekta je prof.dr.sc. Stoja Rešković. Na navedenom projektu sam bio suradnik od 27.4.2017. do 29.2.2020. Web stranica projekta je: [steeldeform.simet.hr](http://steeldeform.simet.hr).

## **ZAHVALA**

Posebnu zahvalu dugujem svojoj mentorici prof.dr.sc. Stoji Rešković koja mi je omogućila svu potrebnu opremu i uzorke za izradu rada, kao i pomogla svojim znanjem, iskustvom i stručnim savjetima pri izradi ovog završnog rada. Zahvaljujem se na ukazanom povjerenju i uključivanju na HRZZ projekt u okviru kojega je izrađen ovaj diplomski rad. Također se zahvaljujem na strpljenju i odvojenom vremenu kako bi završili rad.

Veliku zahvalu iskazujem svojem stručnom voditelju Tinu Brliću, mag.ing.met. koji je sa mnom proveo mnoge sate u laboratoriju pripremajući i ispitivajući uzorke. Bez njegove pomoći, uloženog vremena i truda te stručnih savjeta bilo bi puno teže izraditi ovaj diplomski rad.

Zahvaljujem se izv.prof.dr.sc. Ljerki Slokar Benić i doc.dr.sc. Ivanu Jandrliću na svom prenesenom znanju tijekom studiranja, primjenom kojega mi je bilo znatno lakše napisati diplomski rad. Također se zahvaljujem na izdvojenom vremenu kako bi činili Povjerenstvo za ocjenu i obranu diplomskog rada.

Želim se zahvaliti cijeloj svojoj obitelji i djevojci koji su me uvijek podržavali u svemu što radim i bili mi velika snaga i potpora kroz moj studij, ali i život.

Na kraju, najveću zaslugu ipak želim iskazati svojim roditeljima. Oni su bili uz mene u dobru i zlu i uvijek mi svojim savjetima i postupcima pokušavali olakšati život i školovanje, oni su zaslužni za sve što sam do sad u životu postigao jer su mi davali najveću snagu i vjetar u leđa.

Veliko HVALA svima!

## SAŽETAK

### **Anizotropno ponašanje toplo valjanje trake tijekom hladne deformacije**

Čelik je danas najrasprostranjeniji materijal u svijetu. U svjetskoj proizvodnji čelika valjanje je najčešći proces deformacije. Posljednjih godina razvijaju se novi materijali i nove tehnologije oblikovanja deformacijom. Iz tog razloga nameće se potreba detaljnijeg poznavanja anizotropnih svojstava metalnih materijala, posebno čelika. U ovom radu istražena je anizotropija toplo valjane trake iz niskougličnog čelika statičkim vlačnim pokusom, metalografskom analizom mikrostrukture, metodama termografije i digitalne korelacije slike, te numerički. Utvrđena je niska anizotropija toplo valjane trake, prihvatljiva za tehnologije dubokog izvlačenja. Posebno je istražen utjecaj stupnja deformacije na anizotropno ponašanje toplo valjane trake pri hladnoj deformaciji. Utvrđeno je da do ukupne deformacije od 30% ne postoji anizotropno ponašanje toplo valjane trake tijekom hladne deformacije. Nakon ukupne redukcije od 30% utvrđena je određena anizotropija tijekom hladne deformacije toplovaljane trake. Pokazalo se da su metode termografije i digitalne korelacije slike vrlo pogodne za istraživanje anizotropnog ponašanja toplo valjane trake kod hladne deformacije.

Ključne riječi: anizotropija, toplo valjana traka, niskouglični čelik, statički vlačni pokus, termografija, digitalna korelacija slike (DIC).

## ABSTRACT

### **Anisotropic behavior of hot rolled strip during cold deformation**

Steel is today the most widely used material in the world. In world steel production, rolling is the most common deformation process. In recent years, new materials and new deformation forming technologies have been developed. For this reason, there is need for more detailed knowledge of the anisotropic properties of metallic materials, especially steel. In this paper, anisotropy of hot rolled low carbon steel strip was investigated by static tensile test, metallographic analysis, thermography, digital image correlation and numerical. Low and acceptable anisotropy of hot rolled strip was determined for deep drawing technologies. In particular, the influence of the degree of deformation on the anisotropic behavior of hot rolled strip at cold deformation was investigated. It was found that up to a total deformation of 30% there is no anisotropic behavior of the hot rolled strip during cold deformation. After a total reduction of 30%, certain anisotropy was determined during the cold deformation of the hot-rolled strip. The methods of thermography and digital image correlation have been shown to be very suitable for investigating the anisotropic behavior of the hot spot strip in cold deformation.

Key words: anisotropy, hot rolled strip, low carbon steel, static tensile test, thermography, digital image correlation (DIC).



# SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA.....	IV
1. UVOD .....	1
2. TEORIJSKI DIO .....	2
2.1 Proizvodnja toplo valjane trake iz niskougličnog čelika.....	2
2.1.1 Zagrijavanje uložaka .....	3
2.1.2 Preddeformacija .....	5
2.1.3 Završna deformacija.....	6
2.1.4 Hlađenje trake .....	7
2.2 Svojstva toplo valjane trake iz niskougličnog čelika .....	7
2.2.1 Utjecaj ugljika na svojstva niskougličnog čelika .....	9
2.2.2 Utjecaj mangana na svojstva niskougličnog čelika.....	10
2.2.3 Utjecaj sumpora na svojstva niskougličnog čelika .....	11
2.2.4 Utjecaj fosfora na svojstva niskougličnog čelika.....	11
2.2.5 Utjecaj ostalih elemenata na svojstva toplo valjane trake.....	12
2.3 Anizotropno ponašanje toplo valjanje trake tijekom hladne deformacije.....	13
2.4 Utjecaj anizotropije toplo valjane trake na tehnološke procese oblikovanja trake hladnom deformacijom .....	16
2.4.1 Duboko izvlačenje.....	16
2.4.2 Hidrooblikovanje.....	18
2.4.3 Inkrementalno oblikovanje.....	19
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	20
3.1 Uzorci .....	20
3.2 Statički vlačni pokus .....	20
3.3 Digitalna korelacija slike (DIC) .....	21
3.4 Termografija.....	23
3.5 Metalografska analiza.....	25
4. REZULTATI I DISKUSIJA .....	29
4.1 Svojstva toplo valjane trake .....	29
4.1.1 Anizotropija toplo valjane trake .....	33
4.2 Utjecaj stupnja deformacije na anizotropno ponašanje trake tijekom deformacije .....	42
5. ZAKLJUČAK .....	58
6. LITERATURA.....	59
7. ŽIVOTOPIS .....	62

## POPIS SLIKA

Slika 1. Utjecaj temperature zagrijavanja na mikrostrukturu [11] .....	3
Slika 2. Grafički prikaz procesa zagrijavanja [7].....	4
Slika 3. Proces toplog valjanja i rekristalizacije [1].....	5
Slika 4. Prikaz rekristalizacije u deformiranom zrnju [1] .....	5
Slika 5. Usitnjenje zrna pri toploj plastičnoj deformaciji [1].....	6
Slika 6. Utjecaj 50% temperature transformacije na vlačnu čvrstoću niskougljičnog čelika [12] .....	7
Slika 7. Ovisnost deformacijskog otpora i brzine deformacije [1].....	8
Slika 8. Ovisnost prirodnog deformacijskog otpora o temperaturi i brzini ispitivanja za čelik [1] .....	8
Slika 9. Ovisnost mehaničkih svojstava o stupnju deformacije [1] .....	9
Slika 10. Utjecaj ugljika na mehanička svojstva čelika [1].....	9
Slika 11. Ovisnost mehaničkih svojstava o postotku ugljika kod perlitnih čelika [1] .....	10
Slika 12. Utjecaj udjela fosfora i sumpora na žilavost podeutektoidnih čelika [1].....	11
Slika 13. Utjecaj legirajućih elemenata na temperaturu fazne transformacije $A_1$ [3].....	12
Slika 14. Greške u kristalnoj rešetci [11] .....	13
Slika 15. Sulfidi u čeliku nakon a) skrućivanja, b) gnječenja [31] .....	14
Slika 16. Prikaz načina uzimanja epruveta ovisno o smjeru valjanja [33].....	15
Slika 17. Složena shema deformacije pri dubokom izvlačenju [36] .....	17
Slika 18. Pojava ušičavosti kod dubokog izvlačenja čelika [35] .....	17
Slika 19. Promjena mikrostrukture hladno deformirane trake nakon zagrijavanja [11] .....	18
Slika 20. Proces hidrooblikovanja dvostrukih limova i dobiveni proizvod [37] .....	18
Slika 21. Shema naprezanja i deformacija pri hidrooblikovanju [38].....	19
Slika 22. Shema inkrementalnog oblikovanja krnjeg stošca u jednoj točki, a) poprečni presjek, b) spiralna putanja vertikalnog pomaka $\Delta z$ i SC – desno [35].....	19
Slika 23. Uzorak koji se koristi za statički vlačni pokus obrađen na CNC stroju.....	20
Slika 24. Kidalica Zwick 50 kN .....	21
Slika 25. Kamera SONY korištena za metodu digitalne korelacije slike.....	22
Slika 26. Brusilica Einhell TC-WD 150/200 .....	22
Slika 27. Uzorak za statički vlačni pokus i DIC: a) nakon brušenja, b) nakon nanošenja premaza .....	23
Slika 28. Korišteni premazi: a) crni mat premaz, b) bijeli premaz .....	23
Slika 29. Nanošenje premaza .....	24
Slika 30. Uzorak nakon nanošenja crnog mat premaza.....	24
Slika 31. DIC i termografska kamera postavljene za ispitivanje statičkim vlačnim pokusom	25
Slika 32. Način uzimanja uzoraka za metalografska ispitivanja početna mikrostrukture za sva tri smjera (Smjer valjanja, okomito na smjer valjanja, pod kutem $45^\circ$ u odnosu na smjer valjanja).....	26
Slika 33. Uređaj Buehler ABRASIMET 2 za rezanje uzoraka kod metalografske pripreme ..	26
Slika 34. Način uzimanja uzoraka za metalografska ispitivanja mikrostrukture nakon loma za sva tri smjera (Smjer valjanja, okomito na smjer valjanja, pod kutem $45^\circ$ u odnosu na smjer valjanja).....	27
Slika 35. Uređaj SimpliMet 1000 za ulaganje uzoraka toplim prešanjem .....	27
Slika 36. Uređaj PHOENIX BETA GRINDING/POLISHER s glavom Vector LC .....	28
Slika 37. Svjetlosni mikroskop Olympus GX 51 s digitalnom kamerom DP70 .....	28
Slika 38. Ovisnost mehaničkih svojstava toplo valjanje trake o smjeru uzimanja uzoraka.....	29
Slika 39. Uzorci nakon statičkog vlačnog ispitivanja kut $0^\circ$ .....	30
Slika 40. Uzorci nakon statičkog vlačnog ispitivanja kut $90^\circ$ .....	30

Slika 41. Uzorci nakon statičkog vlačnog ispitivanja kut $45^\circ$ .....	30
Slika 42. Početna mikrostruktura niskougljičnog čelika u smjeru valjanja ( $0^\circ$ ): a) okomito na uzorak u smjeru valjanja, b) u smjeru uzorka u smjeru valjanja.....	31
Slika 43. Početna mikrostruktura niskougljičnog čelika okomito na smjer valjanja ( $90^\circ$ ): a) okomito na uzorak izrezan okomito na smjer valjanja, b) u smjeru uzorka izrezanog okomito na smjer valjanja.....	32
Slika 44. Početna mikrostruktura niskougljičnog čelika pod kutom $45^\circ$ u odnosu na smjer valjanja: a) okomito na uzorak izrezan pod kutom $45^\circ$ u odnosu na smjer valjanja, b) u smjeru uzorka izrezanog pod kutom $45^\circ$ u odnosu na smjer valjanja.....	33
Slika 45. Termogrami uzoraka u karakterističnim točkama pri razvlačenju.....	34
Slika 46. Linijska analiza promjene naprezanja u zoni deformacije uzoraka toplo valjane trake uzetih u različitim smjerovima u odnosu na smjer valjanja trake .....	35
Slika 47. Dijagram promjene maksimalne temperature tijekom deformacije.....	36
Slika 48. Dijagram promjene maksimalne temperature tijekom deformacije.....	37
Slika 49. Deformacijske mape promjene raspodjele i iznosa naprezanja u karakterističnim točkama pri razvlačenju uzoraka.....	37
Slika 50. Linijska analiza promjene deformacije u zoni deformacije uzoraka toplovaljane trake uzetih u različitim smjerovima u odnosu na smjer valjanja trake .....	38
Slika 51. Promjena deformacije obzirom na smjer uzimanja uzoraka .....	39
Slika 52. Promjena deformacije obzirom na smjer uzimanja uzoraka .....	40
Slika 53. Naprezanje u različitim karakterističnim točkama u odnosu na smjer valjanja niskougljične trake .....	43
Slika 54. Termogrami uzoraka pri razvlačenju kod $R_p$ , $R_{5\%}$ , $R_{10\%}$ , $R_{15\%}$ .....	44
Slika 55. Termogrami uzoraka kod razvlačenja na granicu proporcionalnosti ( $R_p$ ), 15% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju ( $R_{15\%}$ ), 30% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju ( $R_{30\%}$ ), 45% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju ( $R_{45\%}$ ) i vlačnu čvrstoću ( $R_m$ ) i lom.....	45
Slika 56. Linijska analiza promjene maksimalne temperature duž uzorka za točku $R_{15\%}$ .....	46
Slika 57. Linijska analiza promjene maksimalne temperature duž uzorka za točku $R_{30\%}$ .....	46
Slika 58. Linijska analiza promjene maksimalne temperature duž uzorka za točku $R_{45\%}$ .....	47
Slika 59. Linijska analiza promjene maksimalne temperature duž uzorka za točku $R_m$ .....	47
Slika 60. Srednja vrijednost maksimalne promjene temperature ovisno o smjeru uzimanja uzorka za točke: $R_{15\%}$ , $R_{30\%}$ , $R_{45\%}$ , $R_m$ .....	48
Slika 61. Deformacijske mape promjene raspodjele i iznosa naprezanja u karakterističnim točkama pri razvlačenju uzorka ( $R_p$ , $R_{5\%}$ , $R_{10\%}$ i $R_{15\%}$ ) kod tri različita smjera uzimanja uzoraka .....	49
Slika 62. Deformacijske mape promjene raspodjele i iznosa naprezanja za granicu proporcionalnosti ( $R_p$ ), 15% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju ( $R_{15\%}$ ), 30% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju ( $R_{30\%}$ ), 45% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju ( $R_{45\%}$ ) i vlačna čvrstoću ( $R_m$ ) i lom kod tri različita smjera uzimanja uzoraka ..	50
Slika 63. Linijska analiza promjene iznosa deformacije duž ispitnog uzorka .....	51
Slika 64. Linijska analiza promjene deformacije duž ispitnog uzorka za točke $R_p$ .....	51
Slika 65. Linijska analiza promjene deformacije duž ispitnog uzorka za točke $R_{15\%}$ .....	52
Slika 66. Linijska analiza promjene deformacije duž ispitnog uzorka za točke $R_{30\%}$ .....	52
Slika 67. Linijska analiza promjene deformacije duž ispitnog uzorka za točke $R_{45\%}$ .....	53
Slika 68. Linijska analiza promjene deformacije duž ispitnog uzorka za točke $R_m$ .....	53
Slika 69. Srednja promjena deformacije ovisno o smjeru uzimanja uzorka za točke: $R_{15\%}$ , $R_{30\%}$ , $R_{45\%}$ , $R_m$ .....	54
Slika 70. Mikrostruktura niskougljičnog čelika na mjestu najbližem mjestu loma, u smjeru valjanja, nakon statičkog vlačnog ispitivanja.....	55

Slika 71. Mikrostruktura niskougličnog čelika na mjestu najbližem mjestu loma, pod kutom 45° u odnosu na smjer valjanja, nakon statičkog vlačnog ispitivanja.....	55
Slika 72. Mikrostruktura niskougličnog čelika na mjestu najbližem mjestu loma, okomito na smjer valjanja, nakon statičkog vlačnog ispitivanja.....	56
Slika 73. Mikrostruktura niskougličnog čelika na mjestu najdaljem mjestu loma, u smjeru valjanja, nakon statičkog vlačnog ispitivanja.....	56
Slika 74. Mikrostruktura niskougličnog čelika na mjestu najdaljem mjestu loma, pod kutom 45° u odnosu na smjer valjanja, nakon statičkog vlačnog ispitivanja.....	57
Slika 75. Mikrostruktura niskougličnog čelika na mjestu najdaljem mjestu loma, okomito na smjer valjanja, nakon statičkog vlačnog ispitivanja.....	57

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Kemijski sastav ispitivanog niskougljičnog čelika .....	20
Tablica 2. Rezultati ispitivanja niskougljičnog čelika.....	29
Tablica 3. Dimenzije ispitivanih uzoraka niskougljičnog čelika .....	41
Tablica 4. Ovisnost smjera uzimanja uzoraka o faktorima anizotropije .....	42
Tablica 5. Mehanička svojstva niskougljičnog u odnosu na smjer valjanja .....	42

## 1. UVOD

Čelik je željezna legura sa udjelom ugljika manjim od 2%. Uz ugljik i mangan, čelik sadrži prateće elemente (S, F, Cu, Si, itd.) i legirne elemente koji se dodaju u čelik zbog poboljšanja njegovih svojstava (Cr, Ni, Mo, V, W, Ti, Nb) [1]. Veoma je bitan konstrukcijski materijal, stoga se još uvijek provodi veliki broj istraživanja usmjeren povećanju kvalitete čelika. Kako bi se povećala kvaliteta čelika provodi se legiranje i toplinska obrada. Posebna pozornost danas se pridaje provođenju oblikovanja deformiranjem s odabranim parametrima deformacije u svakoj fazi pri čemu se postižu značajno bolja svojstva čelika [2-5].

Danas se sve više pojavljuju napredni materijali (metalne pjene, amorfni materijali, metalni kompoziti, materijali s pamćenjem oblika...), ali čelik i dalje ostaje jedan od najbitnijih materijala.

U svjetskoj proizvodnji metala, valjanje je najzastupljeniji proces deformacije. Razlikujemo toplo i hladno valjanje, ovisno o temperaturi na kojoj se valjanje provodi. Temperaturna granica između ova dva procesa deformacije je temperatura rekristalizacije. Hladno valjanje se obično odvija na sobnoj temperaturi, ali uvijek ispod temperature rekristalizacije. Toplo valjanje se odvija iznad temperature rekristalizacije [6].

Toplim valjanjem se iz lijevanog čelika proizvode trake (debljine do 6 mm), limovi (debljine veće od 6 mm), i različiti profili. Ravnim valjanjem proizvode se trake (debljine manje od 3mm) i ploče (debljine više od 3 mm). Valjanjem profila dobiva se konačni proizvod različita poprečnog presjeka ( plosnati profili, žica, cijevi, šipke različita presjeka (otvoreni i zatvoreni profili), greda, U i I nosač, tračnice itd.) [6,7].

Naknadnom hladnom deformacijom dobivaju se proizvodi koji imaju puno bolju kvalitetu površine, točnije dimenzije, a hladnom deformacijom proizvodima se mogu poboljšati i mehanička svojstva [1,3].

Potražnja za toplo valjanim trakama raste na više načina. Da bi ostale konkurentne, nove i postojeće tvornice moraju se suočiti s ovim izazovom na najbolji mogući način. Proizvodnja vruće trake ključni je element proizvodnje čelika. Budući da je gotovo polovica svih proizvedenih čeličnih proizvoda toplo valjana za trake, valjaonice zahtijevaju maksimalnu prilagodljivost i dostupnost u kombinaciji s geometrijskom preciznošću i sposobnošću stvaranja optimalnih svojstava materijala [8]

Raspon čvrstoće toplo valjane trake i lima kreće se 300 – 600 MPa obzirom na područje primjene. Niskougljični čelici proizvode se različitim legirnim elementima i naknadno obrađuju na odgovarajuće načine kako bi se dobila željena čvrstoća i žilavost. Topla proizvodnja limova i traka sastoji se od [5]:

- zagrijavanja čelika,
- smanjenje debljine na valjačkim postrojenjima,
- završnom valjanju na specifičnoj temperaturi i
- hlađenju vodom na izlaznom stolu.

Toplo valjani čelični limovi i trake koriste se u: automobilskoj, kemijskoj, obrambenoj industriji, strojarstvu, zrakoplovstvu i brodogradnji, te proizvodnji kućanskih aparata i proizvodnji raznim strukturnim zavarivanjima [9].

Danas razvojem novih tehnologija oblikovanja deformiranjem postavljaju se i sve veći zahtjevi na kvalitetu toplovaljane trake. Kod nekih od tih tehnologija vrlo je važna homogenost kako mehaničkih svojstva tako i strukture u cijelom materijalu koji se deformira. Poznato je da čelične trake nemaju jednaka svojstva u smjeru i okomito na smjer valjanja. Ta anizotropija je kod nekih kvaliteta više, a kod nekih manje izražena. Anizotropija se tek nedavno počela intenzivnije izučavati. Do sada se ispitivala na limovima i trakama koji se hladno oblikuju dubokim izvlačenjem. Danas nove tehnologije kao što su hidrooblikovanje, oblikovanje eksplozijom, oblikovanje ultrazvukom, inkrementalno oblikovanje itd., nameću potrebu detaljnijeg poznavanja ponašanja čelika kod hladne deformacije. Zbog toga je istraživanje anizotropije čeličnih limova i traka vrlo važno.

U ovom radu istraživana je toplo valjana traka iz niskougličnog čelika koja se najčešće hladno oblikuje deformacijom u složene profile. Za istraživanje anizotropnog ponašanja toplovaljane trake korišteni su statički vlačni pokus, termografija, digitalna korelacija slike i metalografija. Termografija i digitalna korelacija slike relativno su nove metode za istraživanje ponašanja materijala tijekom deformacije. Termografija se koristi za određivanje iznosa i raspodjele naprezanja u materijalu tijekom deformacije. Digitalna korelacija slike koristi se za određivanje iznosa i raspodjele deformacije u zoni deformacije. Primjena ove dvije metode ispitivanja vrši se istovremeno uz statičko vlačno ispitivanje [10].

Cilj ovog rada je istražiti anizotropno ponašanje toplo valjane trake tijekom hladne deformacije. Istraživanja su provedena u smjeru valjanja trake, okomito na smjer i pod kutem od 45° u odnosu na smjer valjanja trake.

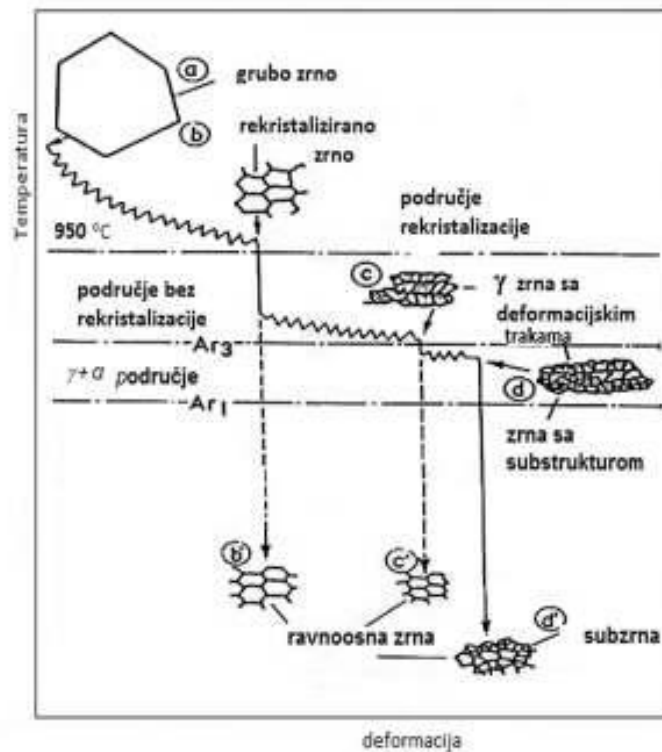
## **2. TEORIJSKI DIO**

### **2.1 Proizvodnja toplo valjane trake iz niskougličnog čelika**

Čelična traka proizvodi se valjanjem. Valjanje je prolazak metala kroz dva ili više valjka koji se okreću u suprotnom smjeru. Valjanje se klasificira prema temperaturi na kojoj se provodi deformacija čelika. Ako je temperatura deformacije metala iznad njegove temperature rekristalizacije, tada se provodi toplo valjanje. Hladno valjanje se provodi na temperaturama nižim od temperature rekristalizacije. Kod toplog valjanja mogu se ostvariti više redukcije obzirom na rekristalizaciju i oporavak [1]. Kod hladne deformacije provode se manje deformacije i dobiva se proizvod točnijih dimenzija i bolje kvalitete površine.

Tehnološki proces proizvodnje toplovaljane trake iz niskougličnog čelika sastoji se od zagrijavanja čeličnog uložka, deformacije koja se najčešće provodi u dvije faze, najprije predeformacije i zatim završnog valjanja, te na kraju hlađenja trake, slika 1. Svaka od ovih faza bitna je za konačna svojstva trake.

Temperatura zagrijavanja čelika, visinska redukcija, završno valjanje i temperatura namatanja imaju važnu ulogu pri proizvodnji niskougličnih traka i ploča. Oni kontroliraju kinetiku različitih fizikalnih i metalurških procesa (austenitizaciju, rekristalizaciju i ponašanje precipitata, faznu transformaciju itd.).



Slika 1. Utjecaj temperature zagrijavanja na mikrostrukturu [11]

Završna mikrostruktura ovisi o tim procesima i njihovoj međusobnoj interakciji [5]. Pravilnim provođenjem svake faze toplog valjanja može se dobiti željena kombinacija vlačne čvrstoće i ostalih bitnih svojstava [5]. Ukoliko nastanu u valjanom materijalu greške u bilo kojoj fazi procesa, one imaju utjecaj na konačna svojstva valjanog proizvoda [1].

### 2.1.1 Zagrijavanje uložaka

Jedan od glavnih preduvjeta za toplo valjanje je zagrijavanje uložaka (blumova, slabova ili biletta) sa sobne temperature na temperaturu valjanja.

Zagrijavanje čelika za proces toplog valjanja najčešće se provodi u potisnim pećima. Zagrijavanje je kontinuirani proces, koji se odvija tako da se peć puni na stražnjem hladnom kraju hladnim uloškom. Uložak zatim prolazi kroz peć i grije se. Nakon što hladni uložak uđe u peć prvo mu se zagrijava vanjska površina. Zatim se kondukcijom toplina prenosi s površine u jezgru. To je spor proces. Dok se to ne dogodi postoji velika temperaturna razlika između površine i jezgre uložka slika 2. Uslijed te razlike u temperaturi može doći do kritičnih naprezanje i pojave pukotina na zagrijavanom komadu.. Kako uzorak putuje prema kraju peći za zagrijavanje, dolazi u kontakt s dimnim plinovima najviše temperature. Na slici 2. prikazan je dijagram zagrijavanja [7].

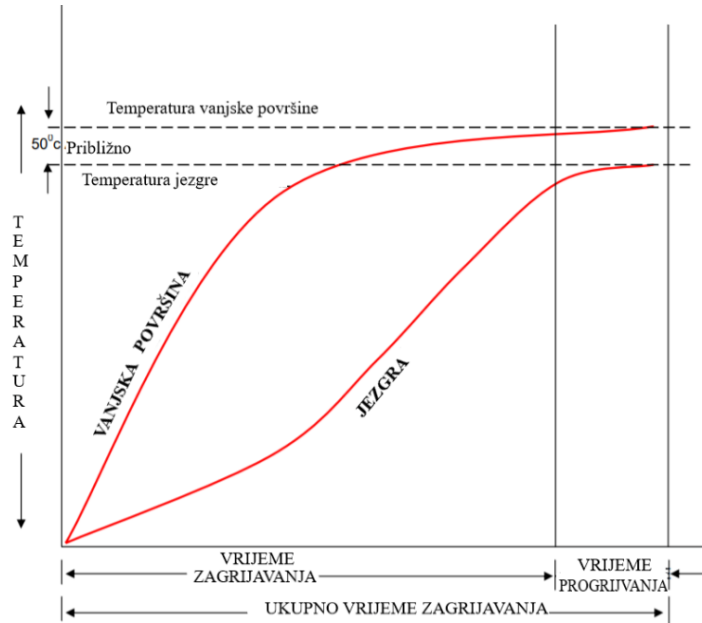
Blumovi ili slabovi se zagrijevaju na temperaturu 1100 – 1300 °C. Provodljivost topline zahtijeva neko vrijeme i usko je povezana sa kemijskim sastavom čelika. Koeficijent toplinske provodljivosti sličan je kod mnogih vrsta čelika, ali je znatno niži kod nehrđajućih čelika.

Blumovi koji su se zagrijali na potrebnu temperaturu za valjanje, izlaze sa prednje strane iz peći i odlaze prema postrojenjima za valjanje. Temperatura pogodna za toplo valjanje blumova i



traka je između 1100 – 1300 °C, stoga temperatura unutar peći za zagrijavanje mora biti viša od te temperature [7].

Pri temperaturi fazne transformacije  $A_{c1}$  austenit počinje nukleirati. Teoretski su moguća dva različita mjesta nukleacije: granica zrna ferit / ferit i međuprostor ferit / cementit. Nukleacija austenita u međuprostoru ferit / cementit termodinamički je potaknuta lokalnim ugljikom i manganom [5].



Slika 2. Grafički prikaz procesa zagrijavanja [7]

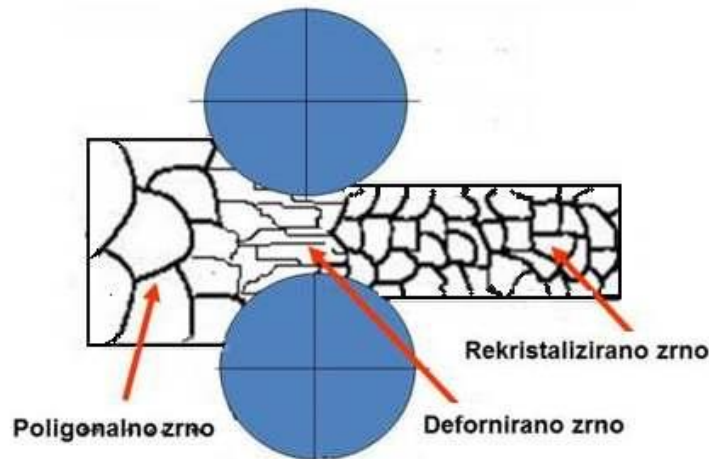
Porastom temperature, kod točke  $A_{c1}$ , čelik se transformira iz faze ferit + perlit u fazu austenita. Temperatura takve fazne promjene ovisi o sadržaju ugljika u čeliku. Ovisno o sadržaju ugljika, temperatura fazne promjene se povećava ili smanjuje. U praksi se čelik zagrijava na temperaturu 50 - 100 °C iznad temperature fazne promjene. Razlog tome je što čelik, osim što mu varira sadržaj ugljika, sadrži i druge elemente koji mogu utjecati na temperaturu fazne pretvorbe austenita u ferit + perlit na kraju procesa valjanja [7].

Temperatura zagrijavanja mora biti dovoljno visoka da se sve planirane deformacije provedu u austenitnom području.

Vrijeme zagrijavanja je također vrlo važno. Temperatura i vrijeme progrijavanja su važni jer utječu na kvalitetu čelika. Ako je vrijeme progrijavanja kraće od propisanog, struktura će biti nehomogena i deformacija se neće odvijati homogeno po cijelom presjeku. To će rezultirati lošim mehaničkim svojstvima trake. Ako su temperatura držanja i vrijeme držanja ingota u peći za zagrijavanje vrlo visoki može doći do rastapljanja jezgre u ingotu što negativno utječe na kvalitetu valjanog čelika. Duže vrijeme zagrijavanja blumova može dovesti do potpunog očvršćavanja ingota prije valjanja. Ako se zagrijavanje provodi predugo može dovesti do heterogenog porasta zrna, što može dovesti do ne homogene strukture koje se odražava na anizotropna svojstva čelika, također može doći do razugljičenja i velikog odgora materijala na površini [1].

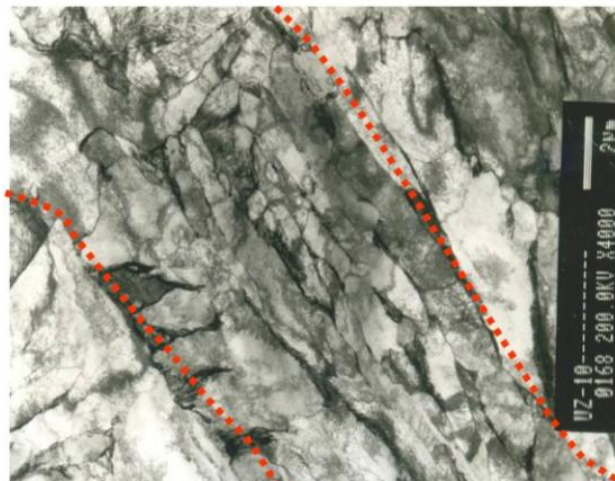
### 2.1.2 Preddeformacija

Preddeformacija se provodi na visokim temperaturama, slika 1., pri čemu se postiže visok stupanj deformacije. Postizanje visokog stupnja deformacije je moguće jer se na ovim temperaturama neometano istovremeno odvijaju procesi deformacije, rekristalizacije i oporavka kristalnog zrna, slika 3.



Slika 3. Proces toplog valjanja i rekristalizacije [1]

Rekristalizacija je proces kod kojeg iz deformiranog valjanjem izduženog austenitnog zrna nastaje više novih sitnih ravnoosnih zrna, slika 4.



Slika 4. Prikaz rekristalizacije u deformiranom zrnu [1]

Nova zrna nastaju zbog velike gustoće dislokacija koje su nastale deformacijom. Tijekom deformacije dislokacije se kreću kroz kristalnu strukturu, dolaze u interakciju s različitim preprekama (greške u kristalnoj rešetci), umnožavaju se i nagomilavaju. Na taj način nastaje subgranica zrna koja kod rekristalizacije postaje granica novog zrna.

Oporavak je proces kod kojeg se zrno ne mijenja, samo se smanjuje gustoća dislokacija. Na taj način se takvo zrno može ponovo deformirati.

Na brzinu rekristalizacije jako utječe količina stupnja deformacije. Ako je stupanj deformacije visok, materijali se rekristaliziraju brže od onih koji se deformiraju s manjim stupnjem deformacije. Ispod određenog stupnja deformacije, koji se naziva kritični stupanj deformacije, rekristalizacija se neće pojaviti. Deformacija pri višim temperaturama omogućuje istodobni oporavak. Volumni udio rekristaliziranih zrna povećava se s temperaturom za određeno vrijeme [12]. Na visokim temperaturama i uz visok stupanj deformacije u materijalu je osigurana dovoljna energija za odvijanje dinamičke rekristalizacije i dinamičkog oporavka tijekom deformacije.

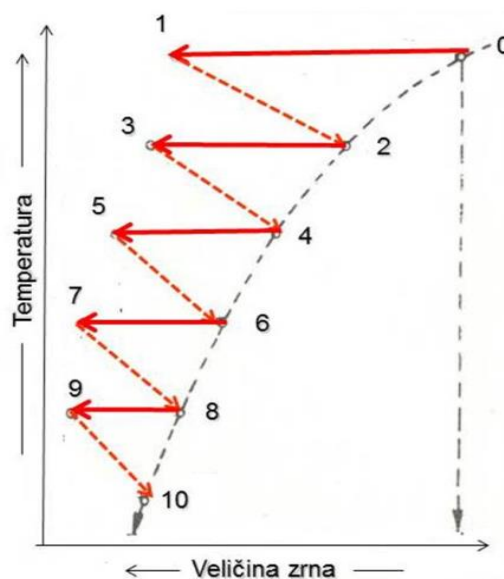
U valjačkim pauzama nastavlja se statička rekristalizacija i statički oporavak. To osigurava da se i u sljedećoj provlaci odnosno deformaciji osigura visok stupanj deformacije. Pri tome se postiže značajno usitnjenje zrna, slika 1.

U predeformaciji se ostvari redukcija početne visine bluma ili slaba za čak i do 85%. Važno je napomenuti da se u predeformaciji valjani blum ili slab okreće pod kutem od  $90^\circ$  više puta kako bi se postigla homogena mikrostruktura [1].

### 2.1.3 Završna deformacija

Na slici 1. vidi se promjena veličine zrna u završnoj deformaciji. Završna deformacija se obično provodi na kontinuiranim prugama u 5 do 7 provlaka pri čemu se nastavlja redukcija debljine trake do konačne dimenzije. U završnoj deformaciji temperature deformacije u pojedinim provlakama su znatno niže nego u predeformaciji [1,2]. I u ovoj fazi odvijaju se procesi rekristalizacije i oporavka što dovodi do daljnjeg usitnjenja zrna, slika 5. [1].

Pri završnom valjanju čelika, temperatura na završnom stanju treba biti iznad temperature rekristalizacije. Obzirom da je stupanj deformacije manji i temperatura valjanja niža, rekristalizacija može izostati u zadnjim provlakama završne deformacije. Važno je voditi računa o brzini valjanja. Brzina rekristalizacije mora biti veća ili jednaka brzini valjanja da bi se rekristalizacija mogla provesti do kraja. U suprotnom dolazi do djelomične rekristalizacije što može dovesti do nehomogenosti u strukturi [1,5,7].

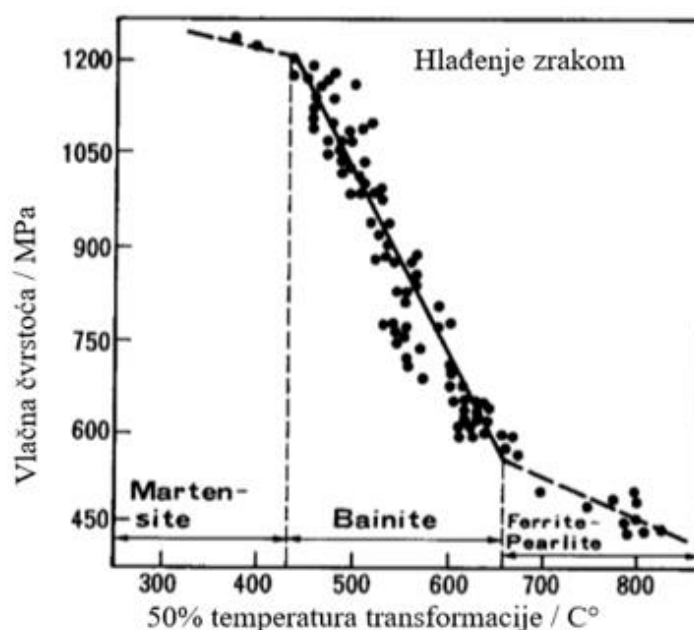


Slika 5. Usitnjenje zrna pri toploj plastičnoj deformaciji [1]

Kod valjanja niskougličnog čelika bitno je da se valjanje završi iznad temperature fazne transformacije austenita u feritno perlitnu strukturu.

### 2.1.4 Hlađenje trake

Čvrstoća i tvrdoća toplo valjane trake ovise kako o kemijskom sastavu tako i o brzini hlađenja nakon toplog valjanja. 1957. godine su Irvine i Pickering dokazali vezu između temperature transformacije austenita u feritno – perlitnu strukturu i vlačne čvrstoće u niskougličnom niskolegiranom čeliku. Na slici 6. je prikazan dijagram koji pokazuje da je glavni utjecaj legirajućih elemenata na čvrstoću pripisan promjeni temperature transformacije [12].



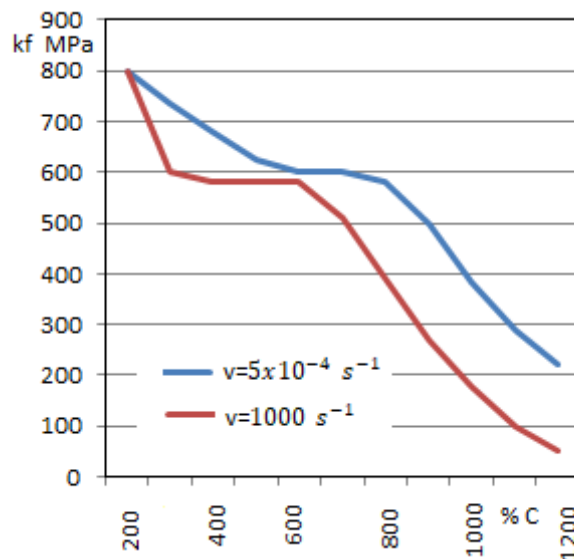
Slika 6. Utjecaj 50% temperature transformacije na vlačnu čvrstoću niskougličnog čelika [12]

Povećanje brzine hlađenja povećava tvrdoću i čvrstoću. Neujednačeno hlađenje stvara puno zaostalih naprežanja, obično se pojavljuje kod proizvoda koji imaju neujednačen presjek. Dimenzijska odstupanja su obično 2 – 5% ukupne dimenzije.

## 2.2 Svojstva toplo valjane trake iz niskougličnog čelika

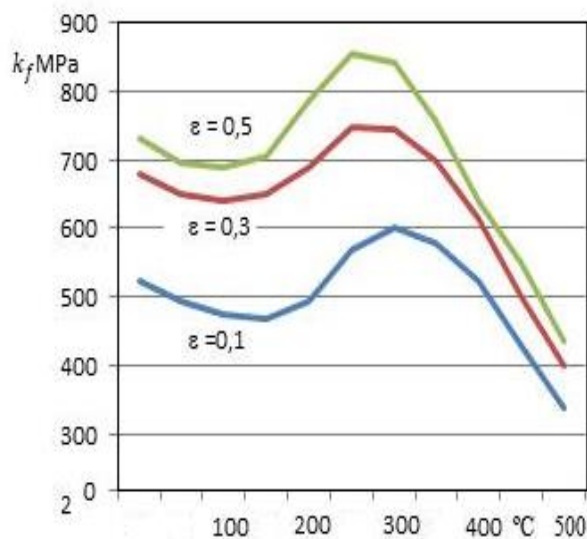
Mehanička svojstva toplovaljane trake iz niskougličnog čelika funkcija su: kemijskog sastava, temperature zagrijavanja, brzine pada temperature tijekom deformacije, brzine deformacije, ukupnog smanjenja visine, vremena oporavka, vremena rekristalizacije, brzine hlađenja nakon deformacije [1]. Mogu se dobro oblikovati u toplom i hladnom stanju, slika 7.

Povećanjem temperature otpor deformaciji se smanjuje. U temperaturnom intervalu 150 - 300 °C, otpor deformaciji se povećava zbog izdvojenih disperznih čestica druge faze koje ometaju plastični tok deformacije.



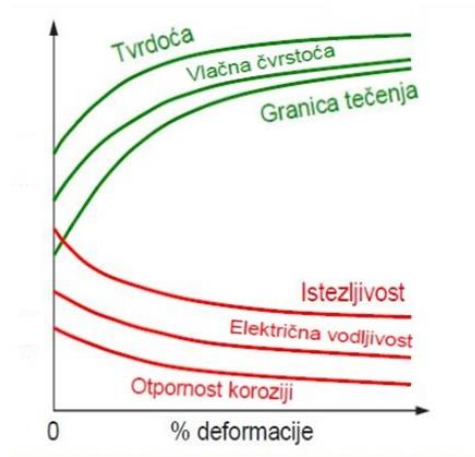
Slika 7. Ovisnost deformacijskog otpora i brzine deformacije [1]

Utjecaj temperature ispitivanja treba promatrati zajedno s utjecajem brzine deformacije [1]. Utjecaj temperature i brzine deformacije na deformacijski otpor prikazan je na slici 8.



Slika 8. Ovisnost prirodnog deformacijskog otpora o temperaturi i brzini ispitivanja za čelik [1]

Ovisnost mehaničkih svojstava čelika o stupnju deformacije prikazan je na slici 9. Povećanjem stupnja deformacije raste tvrdoća, čvrstoća i granica tečenja u materijalu, a opada istezljivost, električna vodljivost i otpornost na koroziju. Promjenom parametara deformacije moguće je dobiti poželjnu mikrostrukturu, veličinu i orijentaciju zrna. Na taj način niskouglični čelici imaju dobru deformabilnost i mehanička svojstva [13].



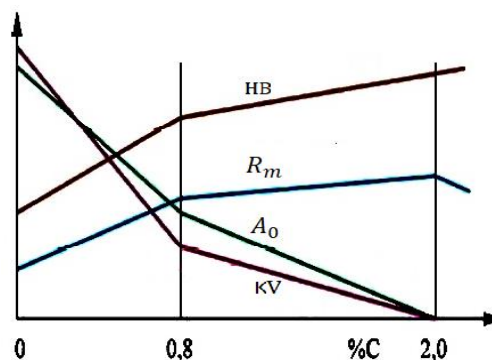
Slika 9. Ovisnost mehaničkih svojstava o stupnju deformacije [1]

Na svojstva tople valjane trake najveći utjecaj ima kemijski sastav čelika. Odnosno sadržaj ugljika i mangana, te sumpor i fosfor kao prateći elementi u čeliku. Sadržaj i drugih legiranih elemenata može utjecati na mehanička svojstva toplovaljane trake i njenu naknadnu deformabilnost u hladnom stanju. [1]

### 2.2.1 Utjecaj ugljika na svojstva niskougljičnog čelika

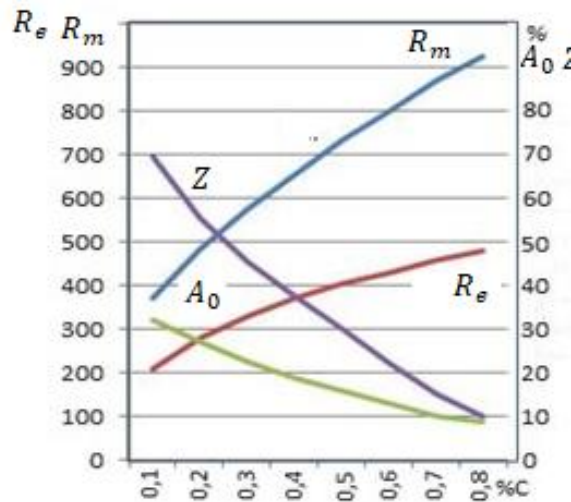
Ugljik je osnovni element u čeliku i zajedno s manganom ima najveći utjecaj na svojstva čelika. Utjecaj sadržaja ugljika na mehanička svojstva prikazan je na slici 10. [1].

Porast udjela perlitne faze znatno očvršćuje čelik. Čvrstoća perlita je za oko tri puta veća od čvrstoće ferita. U nadeutektoidnom području čvrstoća sporije raste zbog velike krhkosti čelika.



Slika 10. Utjecaj ugljika na mehanička svojstva čelika [1]

Povećanje C za svakih 0.1 % povećava  $R_m$  za 90 MPa,  $R_e$  za 45 MPa, a tvrdoću za 7.3 %, dok se povećanjem % C smanjuje plastičnost, istezanje i sužavanje, slika 11. [1].



Slika 11. Ovisnost mehaničkih svojstva o postotku ugljika kod perlitnih čelika [1]

Veća mogućnost istezanja poboljšava sposobnost oblikovanja. Iz tog razloga proizvođači su se, kada su to kupci tražili, usmjerili ka proizvodnji čelika sa niskom granicom proporcionalnosti, a visokom mogućnosti produljenja.

Laboratorijska istraživanja i industrijska praksa pokazali su da je istovremeno postizanje visoke čvrstoće, visoke otpornosti na udar i dobre zavarljivosti moguće postići kod čelika s niskim sadržajem ugljika. Generalno niski udio nemetalnih dodataka i plinova, te dodatak mangana i mikrolegirajućih elemenata (Mo, V, Nb, Ti, Al) osigurava postizanje željene granice proporcionalnosti uz primjenu odgovarajućih parametara toplog valjanja. Primjena uvjeta za ekvivalent ugljika  $C_e < 0.43$  prema normama za zavarivanje čelika eliminira mogućnost primjene maksimalno dopuštenog sadržaja ugljika i mangana. Kod niskougljičnih čelika, karakteriziranih visokom čvrstoćom uz dobru žilavost i istezljivost te dobrom zavarljivošću, smanjenje sadržaja ugljika kompenzira se dodatkom mikrolegirajućih elemenata niobija, vanadija ili titana. Otvrđnjavanje je uzrokovano stvaranjem spojeva ugljika i dušika s mikrolegirajućim elementima [14].

Kako bi se razumio utjecaj mikrolegirajućih elemenata na mehanička svojstva, potrebno je poznavati procese između mikrolegirajućih elemenata i njihovih spojeva s dušikom i kisikom [15].

## 2.2.2 Utjecaj mangana na svojstva niskougljičnog čelika

Mangan (Mn) se poslije ugljika smatra drugim najvažnijim elementom u čeliku. 80 – 90% svjetske potrošnje mangana se odnosi na proizvodnju čelika. Za sad još nije pronađena zadovoljavajuća zamjena za mangan u čeliku, koja bi mogla spojiti nisku cijenu i zadovoljavajuće tehničke karakteristike [16-18].

Mangan povećava tvrdoću i čvrstoću čelika, ali u manjoj mjeri od ugljika. Također može smanjiti kritičnu brzinu hlađenja tijekom stvrđnjavanja, povećavajući tako otvrđnjavanje mnogo učinkovitije od bilo kojeg drugog legirajućeg elementa. Djeluje kao blago sredstvo za dezoksidaciju. Mangan može tvoriti mangan sulfide sa sumporom (MnS) što je korisno za strojnu obradu, ali ima velik utjecaj na anizotropna svojstva traka. MnS sprječava nastajanje

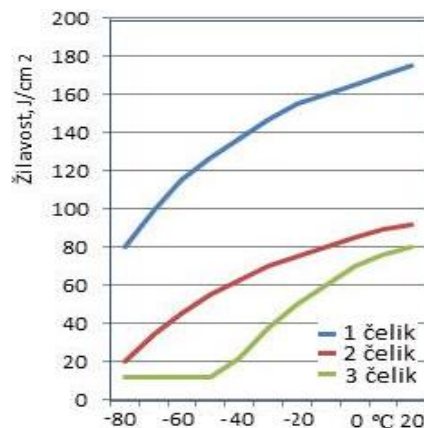
željezo sulfida (FeS), ali obzirom da je mekši od ostalih mikrokonstituenata kod valjanja može dovesti do stvaranja trakaste mikrostrukture. Pri valjanju mangan povišuje čvrstoću i žilavost snižavanjem temperature raspadanja austenita prilikom hlađenja čime se dobije sitnozrnata feritna struktura. Također snižava otvrdnjavanje ferita. Smanjenjem veličine zrna povećava se granica proporcionalnosti i ostala važna svojstva. Mn snižava sposobnost deformiranja čelika, stoga takvi čelici daju veći otpor deformaciji tijekom valjanja [1,16-18]. Učinkovitost djelovanja mangana ovisi o sadržaju kisika i sumpora u čeliku.

### 2.2.3 Utjecaj sumpora na svojstva niskougličnog čelika

Sumpor uz fosfor tvori štetne primjese u čeliku. Poželjan je u što manjim količinama jer naginje segregacijama, te smanjuje žilavost i plastičnost. U čeliku ga pri proizvodnji uvijek ostaje u granicama 0,005 do 0,006 %. Već pri jako malim količinama tvori FeS i dovodi to crvenog loma. Topla deformacija provodi se na temperaturama iznad 1000 °C zbog toga dolazi do taljenja FeS kojem je talište na 985 °C. Pri zavarivanju i kovanu čelika dolazi do taljenja sulfida što za posljedicu ima stvaranje toplih pukotina na granicama zrna [1]. Danas se u proizvodnji donekle uspijeva kontrolirati sadržaj sumpora. Naime čelici sadrže malo sumpora i zbog toga je pojava toplih pukotina rijetka. Kako bi se uklonio štetan utjecaj sumpora dodaje se mangan koji veže sumpor na sebe i nastaje MnS. Brzim hlađenjem kod  $\gamma \rightarrow \alpha$  transformacije ovakav štetan utjecaj sumpora može se djelomično ili u potpunosti odstraniti [1].

### 2.2.4 Utjecaj fosfora na svojstva niskougličnog čelika

Fosfor je također nepoželjna primjesa u čeliku. Kao i sumpor, poželjan je u što manjim količinama. Dovodi do krhkosti čelika i nehomogenosti u sadržaju ugljika u čeliku. Već male količine fosfora u čeliku dovode do smanjenja njegove žilavosti i duktilnosti, slika 12. [1]. Na mjestima koja su bogata fosforom a siromašna ugljikom dolazi do izdvajanja ferita tijekom hlađenja, dok se perlit izdvaja na mjesta koja su bogata ugljikom, a siromašna fosforom. Iz tog razloga zone koje imaju različit sadržaj fosfora imaju i različita mehanička svojstva poput tvrdoće, žilavosti i čvrstoće [1].



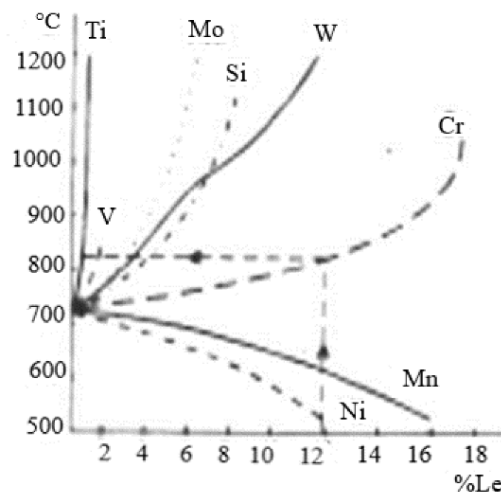
Slika 12. Utjecaj udjela fosfora i sumpora na žilavost podeutektoidnih čelika [1]



### 2.2.5 Utjecaj ostalih elemenata na svojstva toplo valjane trake

Svaki legirajući element ima drugačiji utjecaj na temperaturu  $A_1$ . Temperatura  $A_1$  je temperatura koja odgovara faznoj transformaciji, a naziva se još i eutektoidna izoterma. Kao što je vidljivo sa slike 6. smanjenje temperature transformacije dovesti će do povećanja vlačne čvrstoće čelika. Slika 13. pokazuje utjecaj legirajućih elemenata na temperaturu fazne transformacije  $A_1$  [3].

Niskougljični čelik mikrolegiran niobijem sadrži do 0.05% Nb, 0.14% C i 0.009% N [19,20]. Prikladnim odabirom parametara termomehaničke obrade te odgovarajućim sadržajem niobija i ugljika poboljšavaju se mehanička svojstva valjanog čelika te se postiže usitnjene feritnog zrna. Niobij stvara karbide, nitrde ili karbonitrde vezanjem za čestice ugljika i dušika. Na taj način čini prepreku kretanju dislokacija što utječe na mehanizam rekristalizacije, faznu transformaciju, oporavak kod deformacije u toplom stanju i mehanička svojstva [20-22].



Slika 13. Utjecaj legirajućih elemenata na temperaturu fazne transformacije  $A_1$  [3]

Osim sitnog zrna niobij također stvara fine precipitate koji sprječavaju kretanje dislokacija. Niobijevi precipitati tijekom toplog valjanja sprječavaju rekristalizaciju, što za posljedicu ima stvaranje jako finih feritnih zrna iz austenitnih zrna [20,23]. Da bi se izlučili niobijevi precipitati završno valjanje potrebno je provesti na nižoj temperaturi u usporedbi sa završnim valjanjem ostalih mikrolegiranih čelika [19,20,24].

Jedna od metoda koje se koriste za poboljšanje sposobnosti oblikovanja čelika je dodavanje bora. Nisko ugljični čelici sa dodatkom bora postižu odličnu sposobnost oblikovanja spuštanjem granice proporcionalnosti i povećanjem mogućnosti istežljivosti. Istraživanja [25] su pokazala da nisko ugljični čelici koji nemaju dodatak bora imaju veću vlačnu čvrstoću i granicu proporcionalnosti od čelika s dodatkom bora (dodatak bora je oko 50 ppm.). Također veličina feritnih zrna je veća kod čelika s dodatkom bora. Grubo zrno je uzrokovano grubo zrnatim precipitatima BN, što dovodi do toga da se nova granica zrna brže kreće tijekom rekristalizacije. Mikrostruktura čelika sa i bez dodatka bora je uglavnom feritna sa malim brojem perlitnih zrna. Grubo zrnati precipitati BN imaju manju djelotvornost za fiksiranje granica zrna od sitnih AlN precipitata u čeliku bez dodatka bora. Dodatkom bora povećava se broj granica zrna koje imaju kut manje od  $15^\circ$  [26,27].

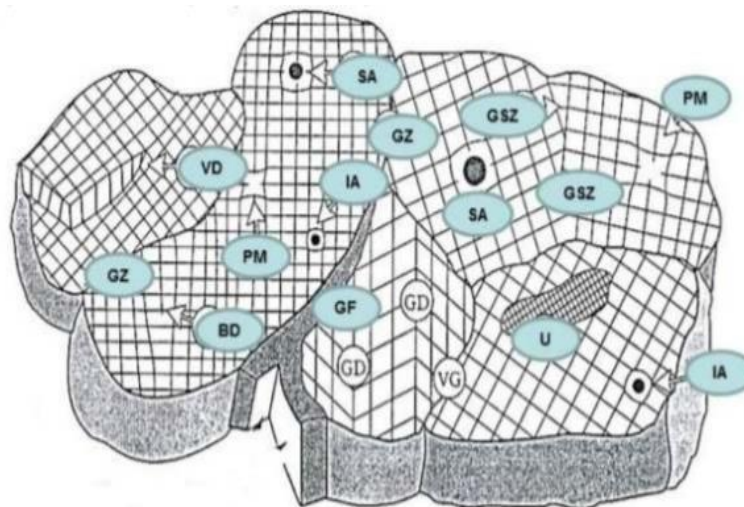
## 2.3 Anizotropno ponašanje toplo valjanje trake tijekom hladne deformacije

Fenomen pojavljivanja različitih svojstava u različitim smjerovima poznat je kao anizotropija. Anizotropija potječe od grčkih riječi: aniso, što znači promjena (razlika) i tropos, što znači smjer, dakle različita svojstva u različitim smjerovima [28,29]. Anizotropija se ponekad naziva i usmjerenost. Ona se ne može primijeniti na volumetrijska svojstva poput gustoće ili specifične topline, ali gotovo sva druga svojstva su osjetljiva na smjer ispitivanja. U to se mogu ubrojiti kemijska i mehanička svojstva. Anizotropija ima veliki utjecaj kada se govori o metalnim materijalima. Suprotno anizotropiji je izotropija gdje materijal pokazuje jednaka svojstva u svim smjerovima. Prava izotropija rijetko se javlja u običnim materijalima i to je zapravo prilično teško postići. Usmjerenost proizlazi iz većine vrsta obrade materijala, npr. plastična deformacija, pa se rijetko izbjegava [30].

Postoje dva glavna razloga zbog kojih dolazi do anizotropije. Najprisutnija je preferirana kristalografska orijentacija. Drugo podrijetlo je poravnanje u mikrostrukturi i posebno raspodjela drugih faza, poput inkluzija. Oba ova efekta često koegzistiraju u materijalu. Utjecaj poravnanja sekundarne faze ima dominantan utjecaj na duktilnost i žilavost. Žilavost valjanih ploča uvijek je inferiornija kada se mjeri okomito na smjer valjanja, u odnosu na žilavost koja se mjeri u smjeru valjanja. Koncentracije sekundarnih faza koje nastaju na interdendritičkim područjima pri skrućivanju raspodijele se u slojeve tijekom toplog valjanja. Istraživanja su pokazala da se žilavost čelika u smjeru Z-a u početku poboljšava vrućim valjanjem uslijed pročišćavanja zrna, ali zatim se znatno smanjuje kako disperzije druge faze postaju usklađene nakon većih redukcija [30].

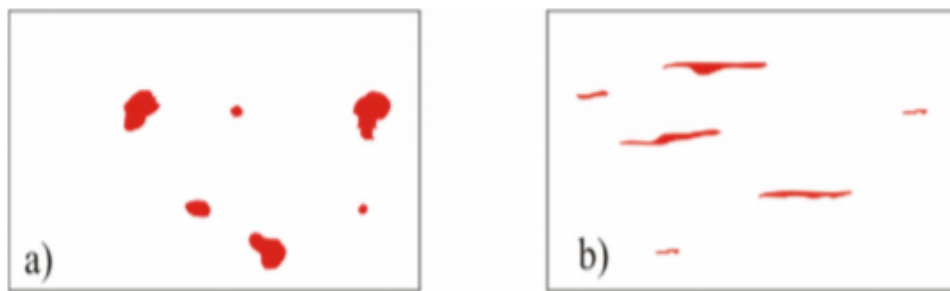
Na pojavu anizotropije utječu greške u kristalnoj rešetci. Greške u kristalnoj rešetci mogu biti točkaste (prazna mjesta (PM), intersticijski atomi (IA) i supstitucijski atomi (SA)), linijske (dislokacije koje mogu biti vijčane (VD) i stepenaste (BD)), površinske (granica zrna (GZ), granica subzrna (GS), granica faza (GF)), te volumne (prazna mjesta (PM), uključci (U)). Slika 14. prikazuje greške u kristalnoj rešetci u realnoj strukturi [11].

Prilikom proizvodnje čelika, u čeliku zaostanu nečistoće koje mogu izazvati nehomogenosti, a time i anizotropiju svojstava. Pogreške kod lijevanja ingota također u kasnijoj preradi mogu uzrokovati greške u poluproizvodima. Pri skrućivanju u realnom kristalu nastane otprilike  $10^8$  grešaka. Ako nastale greške ne leže na ravninama klizanja kristala one ne utječu jače na plastičnu deformaciju [11,31].



Slika 14. Greške u kristalnoj rešetci [11]

Sumpor u čeliku tvori niskotaljivi željezni sulfid ( $T_f = 950\text{ °C}$ ), koji se izlučuje po granicama zrna. Prilikom zagrijavanja čelika na visoke temperature (kod zavarivanja uz sami spoj i kod kovanja) dolazi do taljenja sulfida i nastanka toplih pukotina po granicama zrna. Današnji čelici sadrže uglavnom malo sumpora i pojava toplih pukotina je rijetka. Sumpor u čeliku veže i mangan u manganov sulfid, koji je smješten u obliku izduženih uključaka u sredini poluproizvoda. Ovakvi uključci razbijaju homogenost čelika i slabe ga prema poprečnom opterećenju što dovodi do anizotropije materijala. Slika 15. prikazuje primjer sulfida u čeliku nakon skrućivanja odnosno gnječenja [11,31]



Slika 15. Sulfidi u čeliku nakon a) skrućivanja, b) gnječenja [31]

Koncept anizotropije je vrlo važan, jer se odražava na svojstva materijala, odnosno dijela, ovisno o smjeru. U slučaju valjanja formiraju se visoko intenzivne teksture u smjeru i okomito na smjer valjanja, što može dovesti do značajno različitih mehaničkih svojstava. Mehanička svojstva toplo valjanih čeličnih limova poput otpornosti na deformacije (čvrstoću) i sposobnost deformacije (duktilnost) u korelaciji su s metalurškim svojstvima poput mikrostrukture, veličine zrna itd. [28,32].

Anizotropija u vrlo rijetkim slučajevima može pokazati povoljan učinak na materijalu. Ona gotovo uvijek ima negativan učinak. Anizotropija materijala ima štetne učinke tijekom operacija dubokog izvlačenja, a smanjenje anizotropije povećati će produktivnost i kvalitetu produkta dubokog izvlačenja. Anizotropija u materijalu dovodi do negativnih učinaka na kasnije procese oblikovanja lima, osobito kod dubokog izvlačenja materijala.

Na anizotropiju materijala utječu mnogi faktori: geometrija zrna, uvjeti valjanja, naknadna toplinska obrada, itd. Postoje neka istraživanja koja pokazuju da se indeks anizotropije može smanjiti povećanjem debljine ploče u razmjeru 1,2-2,8 mm. Također otkriveno je kako toplinska obrada dovodi do primjetnog smanjenja anizotropije pogrubljenjem zrna [28,33].

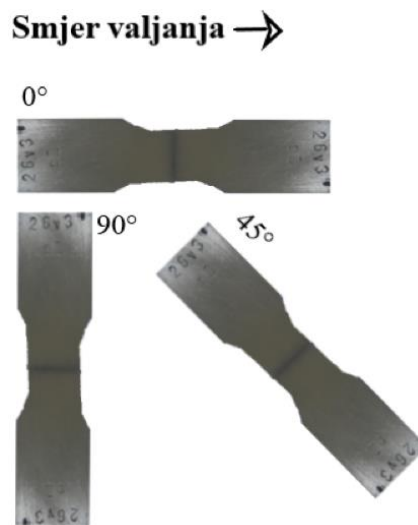
Postoje različite jednadžbe koje se koriste za izračunavanje anizotropije. Kao mjerilo anizotropije materijala izračunavaju se faktori anizotropije. Vertikalna anizotropija –  $r$  vrijednost je logaritamska promjena naprežanja u smjeru širine lima prema promjeni naprežanja u smjeru debljine lima.

Koeficijent  $r$  naziva se još i Lankfordovim koeficijentom. Pomoću koeficijenta  $r$  moguće je dobiti dobru procjenu o sposobnosti lima da se deformira dubokim vučenjem. Koeficijent varira ovisno o smjeru u kojem se uzima uzorak. Moguće ga je izračunati prema sljedećim jednadžbama: [33,34]

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{l}{l_0}} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{l \cdot b}{l_0 \cdot b_0}} \quad (1)$$

gdje je  $\epsilon_w$  – naprezanje u smjeru širine,  $\epsilon_t$  – naprezanje u smjeru debljine,  $b$  – širina ispitivane epruvete nakon deformacije,  $b_0$  – širina ispitivane epruvete prije deformacije,  $l$  – duljina epruvete nakon deformacije,  $l_0$  – početna duljina epruvete.

Kod izotropnih materijala vrijednost  $r = 1$ . Materijali koji imaju vrijednost  $r > 1$  imaju visoku otpornost na plastičnu deformaciju u smjeru debljine ploče. Vrijednost  $r$  nije konstantna nego ovisi kutu u odnosu na kut valjanja ploče. Anizotropija se mjeri statičkim vlačnim pokusom, a epruvete za ispitivanje se izrezuju kao na slici 16. [33,34].



Slika 16. Prikaz načina uzimanja epruveta ovisno o smjeru valjanja [33]

Nakon što se provedu ispitivanja u sva tri smjera, budući da se vrijednost  $r$  mijenja ovisno o smjeru, može se izračunati prosječna vertikalna anizotropija:

$$r_s = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2)$$

Statičkim vlačnim pokusom dobiva se dijagram naprezanje - deformacija. Na dijagramu se može zapaziti nekoliko karakterističnih točaka (granica proporcionalnosti, granica tečenja, vlačna čvrstoća). Ponašanje materijala prije granice proporcionalnosti može se opisati Hookovom jednačinom: [35]

$$\sigma = E * \epsilon \quad (3)$$

gdje je:  $\sigma$  – naprezanje,  $E$  – Youngov modul elastičnosti,  $\epsilon$  - deformacija.

Hollman – Ludwigovom jednadžbom (4) moguće je opisati ponašanje materijala pri tečenju. Ako se govori o području tehnologije obrade materijala jednadžbu (4) moguće je zapisati i kao (5) [35].

$$\sigma = C * \epsilon^n \quad (4)$$

$$k_f = C * \varphi^n \quad (5)$$

gdje  $k_f$  odnosno  $\sigma$  predstavlja naprezanje,  $C$  je faktor materijala, a  $\varphi$ ,  $\epsilon$  predstavlja deformaciju

Na iznos faktora  $C$  i faktora  $n$  utječu: brzina deformacije, temperatura, vrsta materijala i veličina zrna. Kod sitnijeg zrna  $C$  će postati veći a  $n$  manji. Smjer valjanja prilikom proizvodnje ploče i lima ima veliku važnost kod operacija dubokog izvlačenja. Svojstva materijala nisu jednaka u svim smjerovima, tj. dolazi do pojave anizotropije. Ispitivanjem mikrostrukture moguće je primijetiti usmjerenost zrna u odnosu na smjer valjanja [35].

Ovisno o jednadžbi (2) tolerancija za duboko izvlačenje metalnih limova iznosi  $r_s = 0,8 - 6$ . Najniža  $r_s$  vrijednost odnosi se na mjesto u ravnini ploče gdje će najvjerojatnije doći do smanjenja debljine, pojave vrata ili pucanja. Zbog toga se preferira da  $r_n$  vrijednost bude što veća [33,34].

Druga važna mjera za promjenu vrijednosti  $r$  nad ravninom ploče je ravninska anizotropija  $\Delta r$  (6). Ona govori kakvo je odstupanje normalne plastične anizotropije na kut  $\alpha$ .

Kut  $\alpha$  je smjer odrezivanja epruvete ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ): [33,34]

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (6)$$

Ako bi jednadžba (6) bila jednaka nuli, materijal bi se u svim smjerovima mogao jednako rastezati.

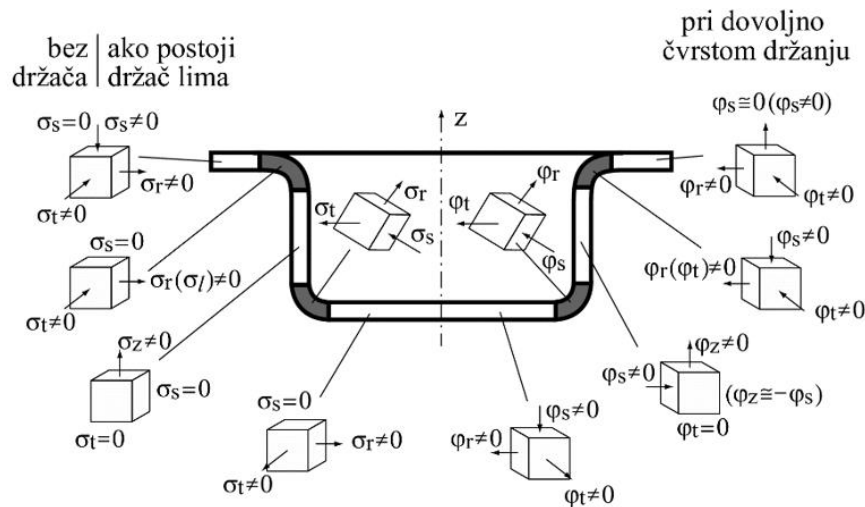
## 2.4 Utjecaj anizotropije toplo valjane trake na tehnološke procese oblikovanja trake hladnom deformacijom

Kod nekih tehnologija hladne deformacije trake anizotropija svojstava toplo valjane trake je bitna. To su tehnologije: dubokog izvlačenja, hidrooblikovanja, inkrementalnog oblikovanja itd. Kod ovih tehnologija sheme naprezanja i sheme deformacije su vrlo složene. Ukoliko postoji anizotropija toplo valjane trake veća od dozvoljene, često nije moguće provesti planiranu deformaciju i dolazi do odstupanja u dimenzijama. To je naročito izraženo kod oblikovanja deformiranjem proizvoda složenog oblika.

### 2.4.1 Duboko izvlačenje

Vrijednost ravninske anizotropije ima značajan utjecaj na proces dubokog izvlačenja. Tijekom procesa dubokog izvlačenja i ostalih tehnologija hladne deformacije dolazi do složenih

shema deformacije i specifičnog ponašanja materijala. Kako bi se to izbjeglo bitno je poznavati anizotropiju materijala. Slika 17. prikazuje složenu shemu kod procesa dubokog izvlačenja.



Slika 17. Složena shema deformacije pri dubokom izvlačenju [36]

Kako je vidljivo sa slike 17. tijekom dubokog izvlačenja postoji više različitih površina u kojima se odvija deformacija. Na svaku površinu utječe različiti smjer deformacije. Kada bi materijal imao mnogo bolja svojstva u smjeru valjanja u odnosu na smjer okomit na smjer valjanja, tada bi došlo do pucanja materijala ili pojave grešaka na najkritičnijim mjestima [35].

Da bi se pravilno provelo duboko izvlačenje faktor anizotropije mora biti različit u svim smjerovima:

$$(r_0 \neq r_{45} \neq r_{90}) \quad (7)$$

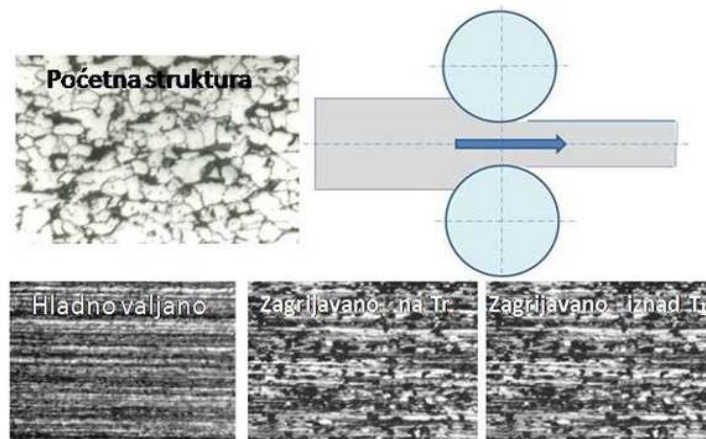
Greška koja nastaje prilikom procesa dubokog izvlačenja zbog anizotropije naziva se ušičavost, slika 18. Ako je vrijednost planarne anizotropije veća od nule dolazi do pojave uha prilikom dubokog izvlačenja pod kutovima  $0^\circ$  i  $90^\circ$ , a ako je vrijednost manja od nule dolazi do pojave uha pod kutom od  $45^\circ$ . Da bi proces dubokog izvlačenja bio uspješan vertikalna anizotropija bi trebala biti što veća, a ravninska anizotropija što manja [33,34].



Slika 18. Pojava ušičavosti kod dubokog izvlačenja čelika [35]

Iz istraživanja [33] se može zaključiti kako se otpad hladno valjanih čelika tijekom procesa dubokog izvlačenja može u velikoj mjeri eliminirati prethodnom toplinskom obradom. Tretman žarenja dovodi do poboljšanja formabilnosti i smanjenja anizotropije hladno valjanog čelika.

Zbog izostanka dinamičke rekristalizacije i oporavka zrna tijekom hladne deformacije (hladno valjane trake) kristalno zrno je izduženo, slika 19.

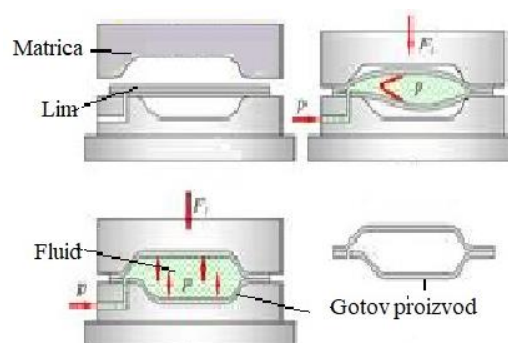


Slika 19. Promjena mikrostrukture hladno deformirane trake nakon zagrijavanja [11]

Naknadnom toplinskom obradom, kako se vidi sa slike, odvija se statička rekristalizacija i dobije homogena mikrostruktura. Tretman žarenja dovodi do poboljšanja deformabilnosti i smanjenja anizotropije hladno valjane čelične trake.

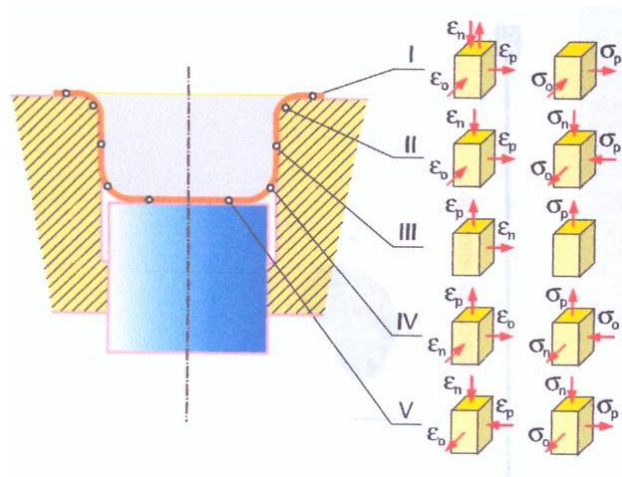
## 2.4.2 Hidrooblikovanje

Metodom hidrooblikovanja, slika 20., mogu se oblikovati vrlo kompleksni oblici u jednom koraku. Zahtjevni geometrijski oblici ograničeni su sa svega nekoliko parametara [11]: tlak oblikovanja, oblik, dopušteno naprezanje materijala, debljina stijenke cijevi.



Slika 20. Proces hidrooblikovanja dvostrukih limova i dobiveni proizvod [37]

Ovom metodom dolazi do manjeg istezanja izratka iz razloga što u većoj mjeri materijal teče uz kalup, a u manjoj mjeri dolazi do slobodnog tečenja. Slika 21. prikazuje složenu shemu naprezanja i deformacije kod metode hidrooblikovanja [11,38].



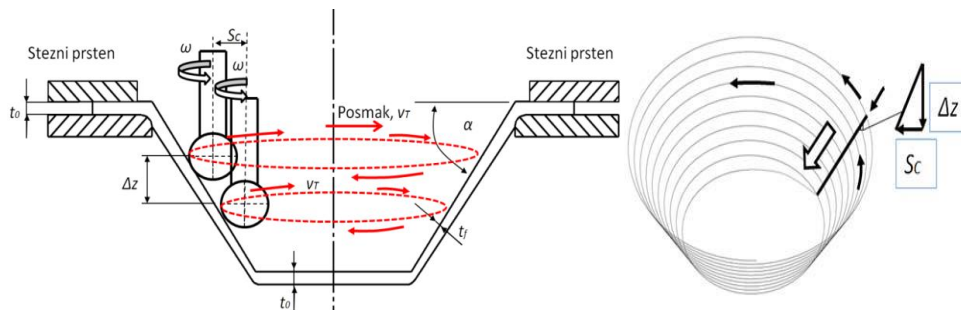
Slika 21. Shema naprezanja i deformacija pri hidrooblikovanju [38]

Ovaj način oblikovanja metala koristi se pri proizvodnji satelitskih antena promjera većeg od 6 metara, u auto i zrakoplovnoj industriji, pri proizvodnji cijevi za puhačke instrumente, itd.

### 2.4.3 Inkrementalno oblikovanje

Devedesetih godina za dobivanje vrlo složenog oblika bilo je potrebno provoditi izvlačenje u više faza s različitim oblicima i dimenzijama alata. Da bi se to pojednostavilo rodila se ideja kako u jednoj fazi bez specijalnih matrica dobiti složene oblike. Jedna od tehnologija kojima se to moglo uspjeti je tehnologija inkrementalnog oblikovanja. Velika prednost ove tehnologije je mogućnost provođenja procesa unosom računalnih naredbi. Moguće je oblikovati različite vrste materijala, a da je pritom prisutna visoka točnost, jednostavan postupak oblikovanja i niski troškovi alata [35].

Metoda inkrementalnog oblikovanja temelji se na univerzalnom sferičnom alatu, koji se pomiče kontroliranim pomacima, slika 22. a), lim se deformira sloj po sloj. Sferični alat svaku sljedeću konturu opisuje tako da čini vertikalne pomake  $\Delta z$ , sve dok se ne postigne željeni oblik, slika 22.



Slika 22. Shema inkrementalnog oblikovanja krnjeg stošca u jednoj točki, a) poprečni presjek, b) spiralna putanja vertikalnog pomaka  $\Delta z$  i SC – desno [35]

Prilikom inkrementalnog oblikovanja u dvije točke, lim se istovremeno deformira gore i dolje. Kalup podržava metalni lim tijekom obrade [35].



### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za obradu kovina deformiranjem u sklopu Zavoda za mehaničku metalurgiju i Laboratoriju za željezo, čelik i ljevarstvo u sklopu Zavoda za procesnu metalurgiju na Metalurškom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

#### 3.1 Uzorci

Uzorci koji su se koristili u svrhu ovog ispitivanja, izrezani su iz trake niskougljičnog čelika. Traka je dobivena toplim – valjanjem. U svrhu ovog ispitivanja koristili su se uzorci pravokutnog poprečnog presjeka. U tablici 1. prikazan je kemijski sastav ispitivanog niskougljičnog čelika.

Tablica 1. Kemijski sastav ispitivanog niskougljičnog čelika

Element	C	Mn	Si	P	S	Al
mas. %	0.13	0.77	0.18	0.010	0.019	0.020

#### 3.2 Statički vlačni pokus

Statičkim vlačnim pokusom ispituje se plastično i elastično ponašanje metala pri vlačnom naprezanju. Ovim ispitivanjem moguće je odrediti istežanje, granicu proporcionalnosti i vlačnu čvrstoću.

Uzorci za statički vlačni pokus pripremljeni su rezanjem na odgovarajuće dimenzije, te obradom CNC strojem na točne dimenzije, slika 23. Dimenzija dobivenih uzoraka za ispitivanje su 45x20x3 mm.



Slika 23. Uzorak koji se koristi za statički vlačni pokus obrađen na CNC stroju

Statičko vlačno ispitivanje se provodi na kidalici. U sklopu ovog istraživanja ispitivanje je provedeno na kidalici Zwick 50 kN, slika 24. Brzina razvlačenja bila je 20 mm / min.



Slika 24. Kidalica Zwick 50 kN

Statički vlačni pokus proveden je na način da se u čeljusti kidalice postavio uzorak. Jedna čeljust kidalice bila je fiksna, a druga je vlačno opterećivala i razvlačila uzorak. Tijekom vlačnog opterećenja kidalica je crtala dijagram sila - produljenje.

### 3.3 Digitalna korelacija slike (DIC)

Digitalna korelacija slike je metoda koja omogućuje da se iz snimljenih pomaka nasumično nanesenih markera odrede iznosi promjene deformacija u određenom vremenu deformacije. Važno je kameru postaviti da tijekom cijelog istezanja vidimo cijeli ispitni dio uzorka, kako bi se uzorak obzirom na svoje produljenje mogao snimati tijekom cijele deformacije. To je bitno radi točnosti određivanja pomaka markera. Metoda se bazira na principu da svaki piksel detektira određeni iznos sive boje. Kako se uzorak deformira tako se mijenjaju razine sivih boja kod određenih piksela i na taj način dobije se informacija o pomaku. Iz tog razloga poželjno je da kamera ima što veći broj piksela. Provedenim eksperimentalnim ispitivanjem dobiju se slike koje se unose u odgovarajući programski paket koji računa iznos promjene deformacije [20,39,40].

Veliku važnost kod ove metode ima priprema uzoraka. Uzorci se prvotno moraju dobro izbrusiti kako bi se otklonile velike neravnine i oksidi, zatim se na glatku površinu nanosi crni mat premaz te na crni mat premaz nasumično se nanose bijeli markeri. Razlika između crne podloge i bijelih markera daje odličan kontrast zbog kojeg se pomaci nanesenih markera mogu uspješno pratiti u odnosu na početno stanje [20,39,40]. U ovom radu metoda digitalne korelacije slike korištena je paralelno sa statičkim vlačnim pokusom. Za metodu digitalne korelacije slike korištena je digitalna kamera: Sony Blackfly S Color (FLIR) rezolucije 3.2 Mpiksela, koja se postavlja okomito u odnosu na ispitivani uzorak, slika 25.



Slika 25. Kamera SONY korištena za metodu digitalne korelacije slike

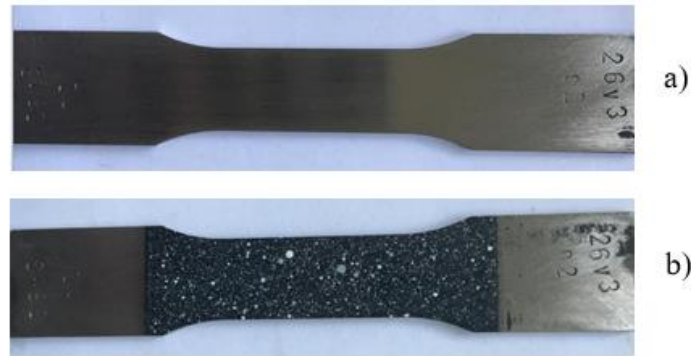
Prije samog ispitivanja provodi se kalibracija kamere. Analiza eksperimentalnih podataka provela se u programskom paketu MatchID.

Pravilna priprema uzoraka za ispitivanje metodom digitalne korelacije slike podrazumijeva dobro izbrušen uzorak kako bi se dobila glatka površina. Uzorci niskougljičnog čelika, slika 23., brušeni su brusilicom Einhell TC-WD 150/200, slika 26.



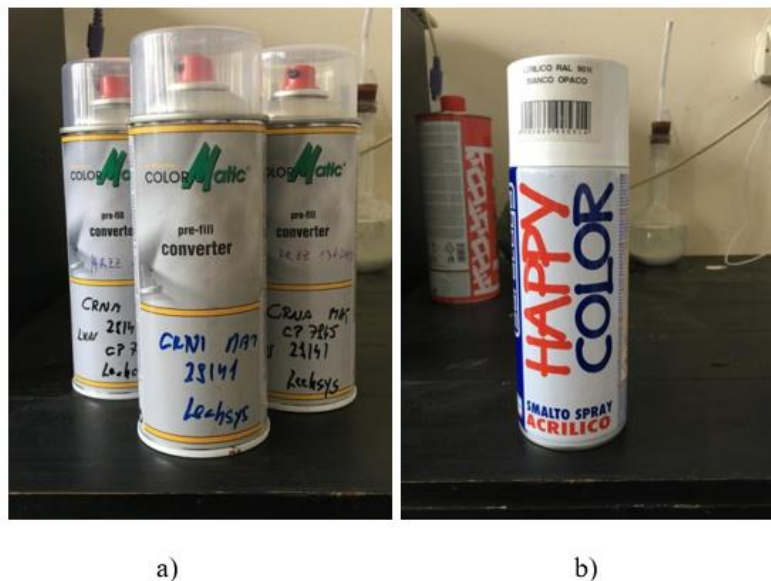
Slika 26. Brusilica Einhell TC-WD 150/200

Nakon brušenja na brusilici provedeno je ručno brušenje brusnim papirom gradacijama 40, 60 i 120. Uzorci nakon brušenja prikazani su na slici 27a. Na tako izbrušen uzorak nanesen je crni mat premaz. Kada se premaz osušio na crnu površinu uzorka naneseni su bijeli nasumično poredani markeri kako bi se ostvario kontrast koji je osnova za ispitivanje metodom digitalne korelacije slike. Pravilno pripremljen uzorak za ispitivanje metodom digitalne korelacije slike prikazan je na slici 27b.



Slika 27. Uzorak za statički vlačni pokus i DIC: a) nakon brušenja, b) nakon nanošenja premaza

Za nanošenje crne podloge korišten je crni mat premaz LECHSYS 29141, slika 28a, a za nanošenje bijelih markera korišten je bijeli premaz RAL 9010, slika 28b.



Slika 28. Korišteni premazi: a) crni mat premaz, b) bijeli premaz

### 3.4 Termografija

Termografija je metoda kojom se mjere temperaturne promjene tijekom deformacije. Tijekom plastične deformacije u uzorku se otpušta toplinska energija koja se manifestira kao temperaturna promjena na površini uzorka. Kako bi se mogla zabilježiti promjena temperature koristi se infracrvena kamera koja na osnovi detektiranja infracrvenih elektromagnetskih valova nevidljivog spektra svjetlosti, koje sva tijela iznad apsolutne 0 emitiraju u okolinu, može detektirati temperaturne promjene predmeta [41,42].

Termografskom kamerom snimaju se termogrami koji se ubacuju u određeni programski paket. Praćenjem promjene temperature tijekom plastične deformacije moguće je dobiti informacije o promjeni i raspodjeli napreznja u zoni deformacije. Metoda termografije pogodna je za detekciju početka plastičnog toka materijala i pojave lokalizacije napreznja [41,42].

Kod metode termografija kao i kod digitalne korelacije slike priprema uzoraka ima veliku važnost. Uzorci se pripremaju na isti način, jedina razlika što za metodu termografije nisu potrebni bijeli nasumično nanoseni markeri, već samo crni mat premaz. Uzorci se prvotno bruse brusilicom sa slike 26., zatim se ručno bruse brusnim papirom gradacijama 40, 60 i 120. Izbrušen uzorak prikazan je na slici 27a. Slike 29. i 30. prikazuju proces nanošenja crnog mat premaza na uzorak i uzorak nakon što se nanese crni mat premaz.

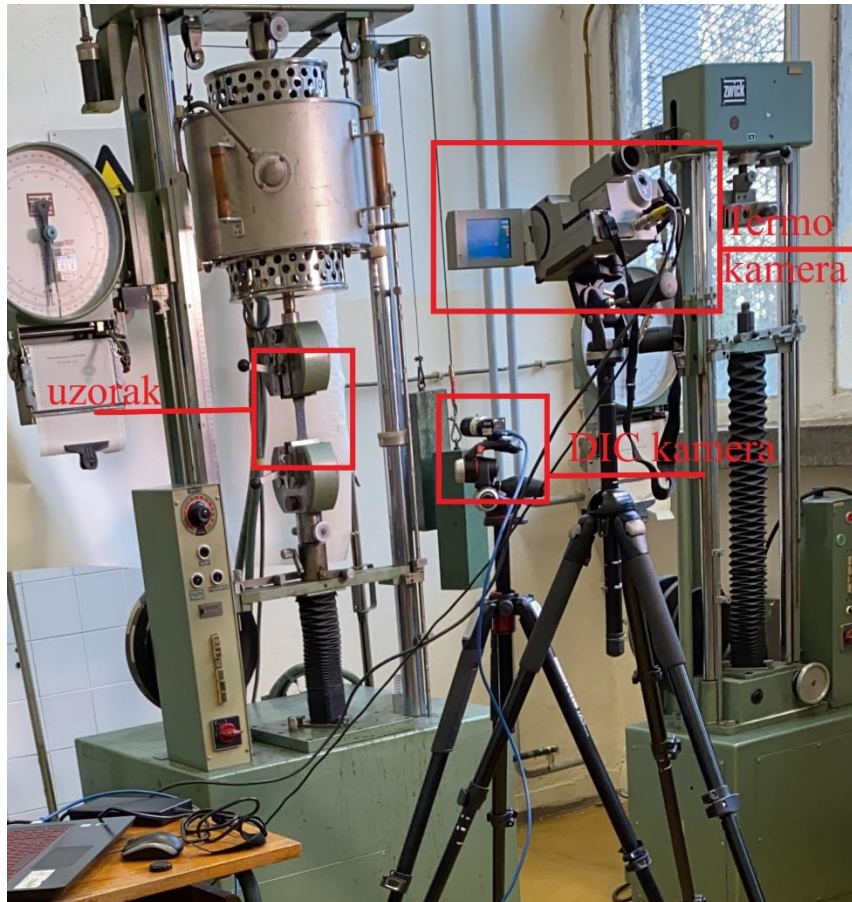


Slika 29. Nanošenje premaza



Slika 30. Uzorak nakon nanošenja crnog mat premaza

Crni mat premaz koji se koristio u svrhu ispitivanja ima faktor emisivnosti 0.95 [41]. Kamera koja se koristila za ispitivanje je VarioCAM M82910. Paralelno su korištene digitalna kamera za DIC i termografska kamera koja je postavljena iznad digitalne pod kutem  $45^\circ$  u odnosu na ravninu s uzorkom, kao što je prikazano na slici 31. Analiza je provedena u programskom paketu IRBIS professional.

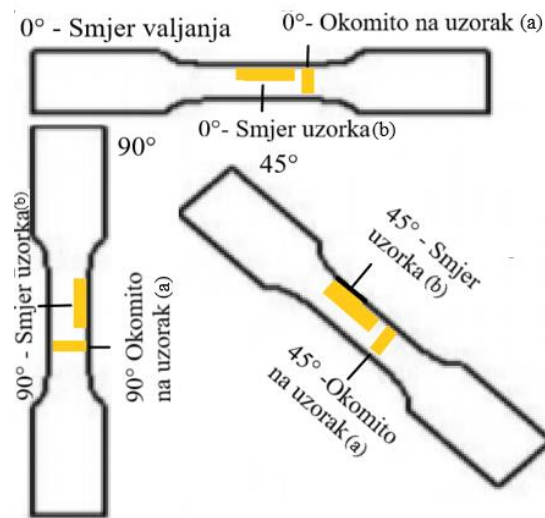


Slika 31. DIC i termografska kamera postavljene za ispitivanje statičkim vlačnim pokusom

Prije provođenja ispitivanja potrebno je podesiti postavke kamere (udaljenost kamere od uzorka, temperatura okoline, faktor emisivnosti premaza...) kako bi se dobio kvalitetniji prikaz dobivenih rezultata.

### 3.5 Metalografska analiza

U svrhu ispitivanja utjecaja mikrostrukture na anizotropno ponašanje niskougličnog čelika, provedena su metalografska ispitivanja početne mikrostrukture i mikrostrukture nakon loma u smjeru valjanja, okomito na smjer valjanja i pod kutom od  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja. Početna mikrostruktura se ispitivala na način da se iz uzorka izrezao referentni komadić u smjeru uzorka i okomito na smjer uzorka. To je napravljeno za sva tri smjera valjanja (okomito na smjer valjanja, u smjeru valjanja i pod kutom od  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja). Prikaz na koji način se uzimao referentni komad prikazan je na slici 32. Uzorak se izrezao na rezalici Buehler ABRASIMET 2, slika 33.

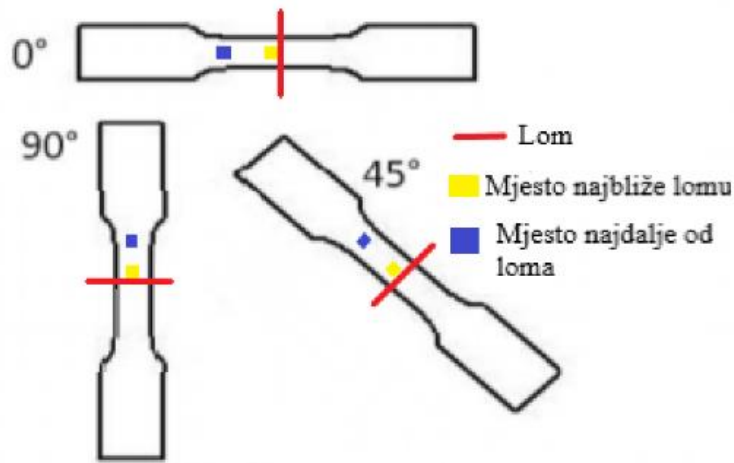


Slika 32. Način uzimanja uzoraka za metalografska ispitivanja početna mikrostrukture za sva tri smjera (Smjer valjanja, okomito na smjer valjanja, pod kutem 45° u odnosu na smjer valjanja)



Slika 33. Uređaj Buehler ABRASIMET 2 za rezanje uzoraka kod metalografske pripreme

Mikrostruktura nakon loma ispitivala se na način da su se uzorci izrezali u području zone deformacije na mjestu najbližem lomu uzorka, te na mjestu koje je najudaljenije od mjesta loma uzorka a nalazi se u zoni deformacije. Slika 34. prikazuje način izrezivanja uzoraka za ispitivanje mikrostrukture nakon loma. Uzorci su izrezani ručnom pilom. Izrezani su za svaki smjer u odnosu na smjer valjanja.



Slika 34. Način uzimanja uzoraka za metalografska ispitivanja mikrostrukture nakon loma za sva tri smjera (Smjer valjanja, okomito na smjer valjanja, pod kutem 45° u odnosu na smjer valjanja)

Uzorci su uloženi u masu Konductomet Buehler na preši SimpliMet 1000, slika 35. Nakon ulaganja uzorci su brušeni na uređaju PHOENIX BETA GRINDING/POLISHER s glavom Vector LC, papirima gradacije 120, 400, 600 i 1200 uz konstantno hlađenje vodom u vremenu od 5 minuta. Zatim se provelo poliranje uzoraka na istom uređaju, slika 36, uz dodatak vodene otopine aluminijske glinice  $\text{Al}_2\text{O}_3$  u vremenu od 5 minuta. Nakon poliranja provedeno je nagrivanje otopinom nitala (5 ml  $\text{HNO}_3$  + 95 ml etanol).



Slika 35. Uređaj SimpliMet 1000 za ulaganje uzoraka toplim prešanjem





Slika 36. Uređaj PHOENIX BETA GRINDING/POLISHER s glavom Vector LC

Metalografska ispitivanja provedena su pri povećanju 500x na mikroskopu Olympus GX 51 s digitalnom kamerom DP70, slika 37 , uz programski paket AnalySIS Materials Research Lab.



Slika 37. Svjetlosni mikroskop Olympus GX 51 s digitalnom kamerom DP70

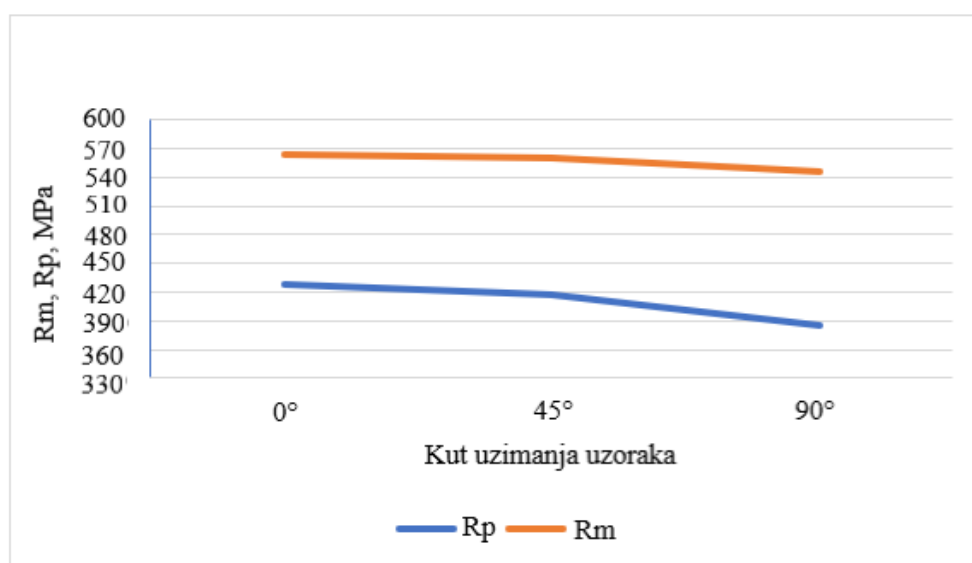
## 4. REZULTATI I DISKUSIJA

### 4.1 Svojstva toplo valjane trake

Na toplo valjanoj traci provedena su mehanička i strukturna ispitivanja na uzorcima uzetim u smjeru valjanja ( $0^\circ$ ), pod kutom od  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja ( $45^\circ$ ) i okomito na smjer valjanja ( $90^\circ$ ). Rezultati provedenih ispitivanja uzoraka iz niskougličnog čelika statičkim vlačnim pokusom prikazani su u tablici 2. i na slici 38.

Tablica 2. Rezultati ispitivanja niskougličnog čelika

Uzorak/ kut u odnosu na kut valjanja ( $^\circ$ )	$R_p$ /MPa	$R_m$ / MPa	A / %
1_0 $^\circ$	438,53	561,95	28,30
2_0 $^\circ$	425,72	562,36	30,11
3_0 $^\circ$	422,20	566,31	31,12
Srednja vrijednost	428,82	563,54	29,84
4_45 $^\circ$	435,97	562,80	28,13
5_45 $^\circ$	424,59	564,65	29,83
6_45 $^\circ$	393,82	555,56	29,80
Srednja vrijednost	418,13	561,01	29,25
7_90 $^\circ$	383,60	551,74	26,39
8_90 $^\circ$	403,51	550,75	28,31
9_90 $^\circ$	367,50	546,45	27,46
Srednja vrijednost	384,87	549,65	27,39



Slika 38. Ovisnost mehaničkih svojstava toplo valjanje trake o smjeru uzimanja uzoraka

Sa slike 38. i iz tablice 2. vidljivo je kako najbolja mehanička svojstva imaju uzorci uzeti u smjeru valjanja ( $0^\circ$ ), a najlošija mehanička svojstva imaju uzorci okomito na smjer valjanja ( $90^\circ$ ). Uzorci uzeti pod kutom  $45^\circ$  imaju malo lošija mehanička svojstva od uzoraka uzetih u smjeru valjanja. Najveću istezljivost također imaju uzorci u smjeru valjanja, a najmanju uzorci okomito na smjer valjanja.

Na slici 39. prikazani su uzorci nakon statičkog vlačnog ispitivanja uzeti iz toplo valjane trake u smjeru valjanja. Slika 40. prikazuje uzorke okomito na smjer valjanja, a slika 41. prikazuje uzorke uzete pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja.



Slika 39. Uzorci nakon statičkog vlačnog ispitivanja kut  $0^\circ$



Slika 40. Uzorci nakon statičkog vlačnog ispitivanja kut  $90^\circ$

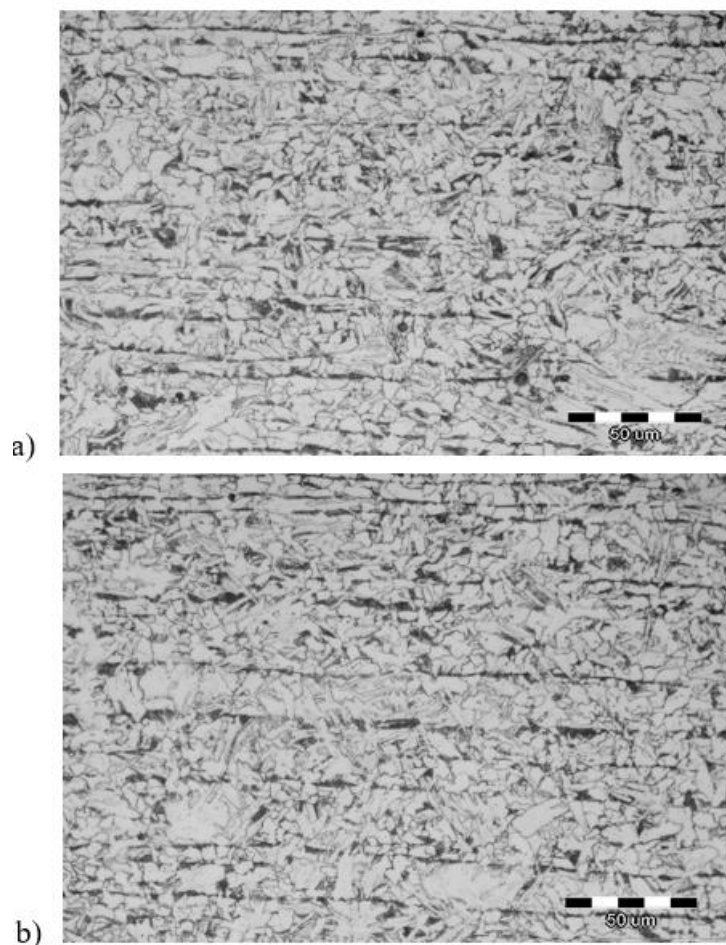


Slika 41. Uzorci nakon statičkog vlačnog ispitivanja kut  $45^\circ$

Iz slika 39., 40. i 41. se vidi da je lom na svim ispitnim uzorcima kod ispitivanja u smjeru i okomito na smjer valjanja trake nastao u sredini zone deformacije. Na uzorcima uzetim pod kutom od  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja trake, lom ispitnih uzoraka nastao je u zoni deformacije ali na različitim mjestima što ukazuje na određenu nehomogenost u strukturi.

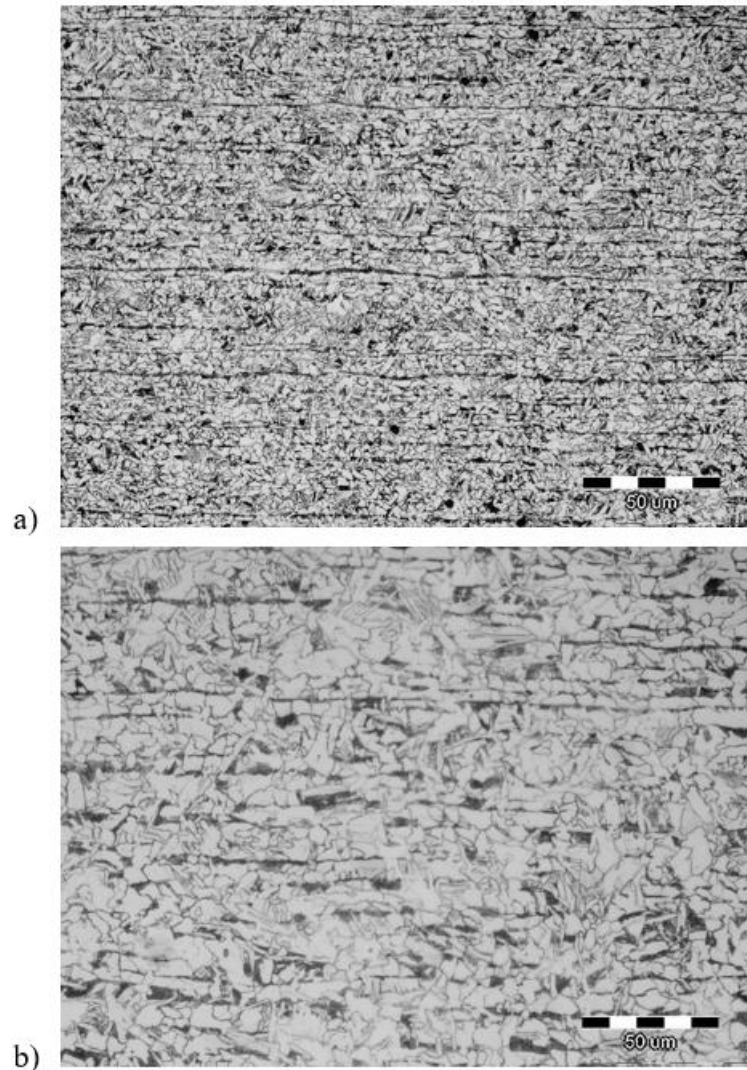
Kako bi se odredio utjecaj mikrostrukture na anizotropno ponašanje niskougličnog čelika provedena su mikrostrukturna ispitivanja. Uzorci za ispitivanje izrezani su kao što je prikazano na slici 32. Za svaki smjer u odnosu na smjer valjanja, uzorci su izrezani okomito na taj smjer razvlačenja ispitnog uzorka i u samom smjeru.

Na slici 42. prikazana je početna mikrostruktura u smjeru valjanja trake. slika 42 a) prikazuje mikrostrukturu koja je uzeta okomito na uzorak uzet u smjeru valjanja, a slika 42 b) prikazuje mikrostrukturu koja je uzeta u smjeru uzorka izrezanog u smjeru valjanja.



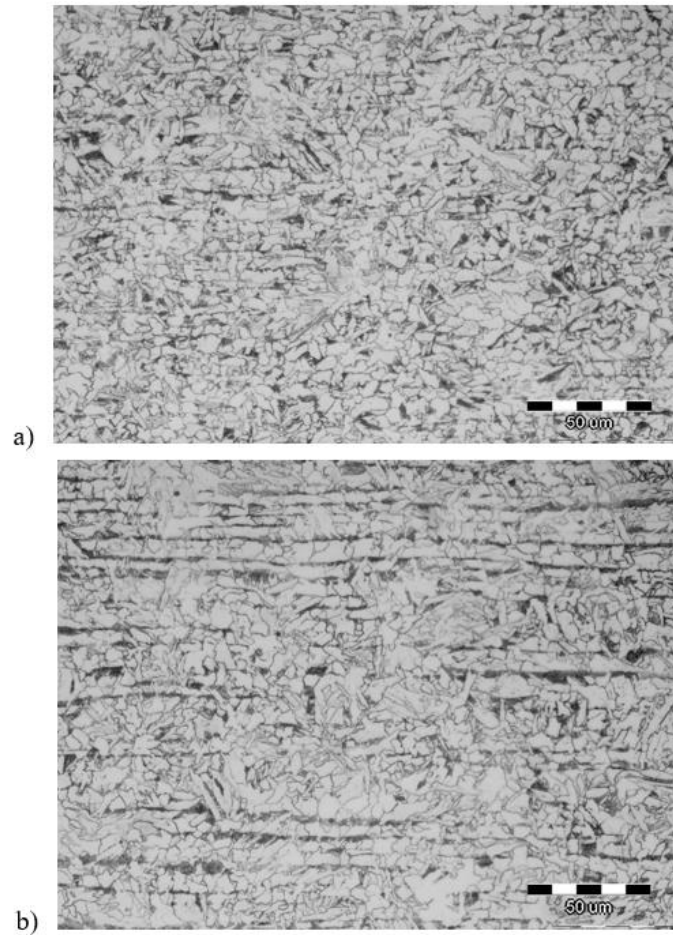
Slika 42. Početna mikrostruktura niskougličnog čelika u smjeru valjanja ( $0^\circ$ ): a) okomito na uzorak u smjeru valjanja, b) u smjeru uzorka u smjeru valjanja

Slika 43. prikazuje početnu mikrostrukturu uzorka koji su izrezani okomito na smjer valjanja. Slika 43 a) prikazuje mikrostrukturu koja je uzeta okomito na uzorak izrezan okomito na smjer valjanja, a slika 43 b) prikazuje mikrostrukturu koja je uzeta u smjeru uzorka izrezanog okomito na smjer valjanja.



Slika 43. Početna mikrostruktura niskougličnog čelika okomito na smjer valjanja ( $90^\circ$ ): a) okomito na uzorak izrezan okomito na smjer valjanja, b) u smjeru uzorka izrezanog okomito na smjer valjanja

Slika 44. prikazuje početnu mikrostrukturu uzorka koji su izrezani pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja. Slika 44 a) prikazuje mikrostrukturu koja je uzeta okomito na uzorak izrezan pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja, a slika 44 b) prikazuje mikrostrukturu koja je uzeta u smjeru uzorka izrezanog pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja.



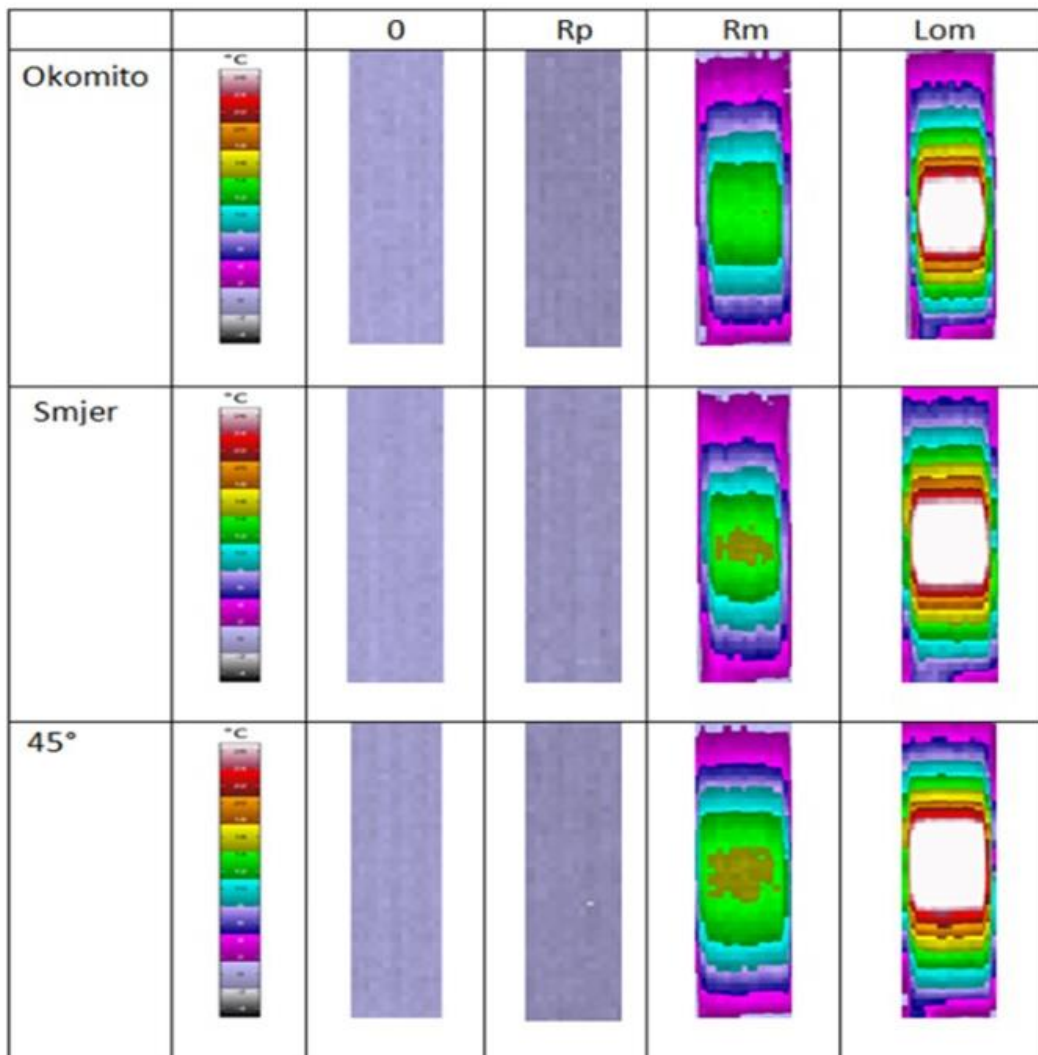
Slika 44. Početna mikrostruktura niskougličnog čelika pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja: a) okomito na uzorak izrezan pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja, b) u smjeru uzorka izrezanog pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja

Sa slika 42 - 44 se vidi da svi uzorci imaju sitnozrnatu feritno perlitnu strukturu. U smjeru valjanja kod svih uzoraka zapažaju se izdužena zrna perlita, dok su zrna ferita više ravnoosna. Dobivena mikrostruktura je očekivana za niskouglične čelike.

#### 4.1.1 Anizotropija toplo valjane trake

Anizotropija toplo valjane trake detaljno je istražena mjerenjem raspodjele naprezanja i deformacija u zoni deformacije na uzorcima uzetim u smjeru valjanja trake, okomito na smjer valjanja i pod kutem od  $45^\circ$  te njihovom usporedbom. Tijekom statičkog vlačnog pokusa istovremeno su mjerene promjene u zoni deformacije metodom termografije i digitalne korelacije slike. Metodama termografije i digitalne korelacije slike provedene su kvalitativna i kvantitativna analiza na početku ( $R_p$ ) i kraju ( $R_m$ ) plastičnog toka materijala te kod loma uzorka.

Na slici 45. prikazani su rezultati kvalitativne analize. Prikazani termogrami dobiveni su analizom termografskih mjerenja u programskom paketu IRBIS professional. Iz termograma se može vidjeti razlika u iznosu i raspodjeli promjene temperature u zoni deformacije tijekom statičkog vlačnog pokusa.



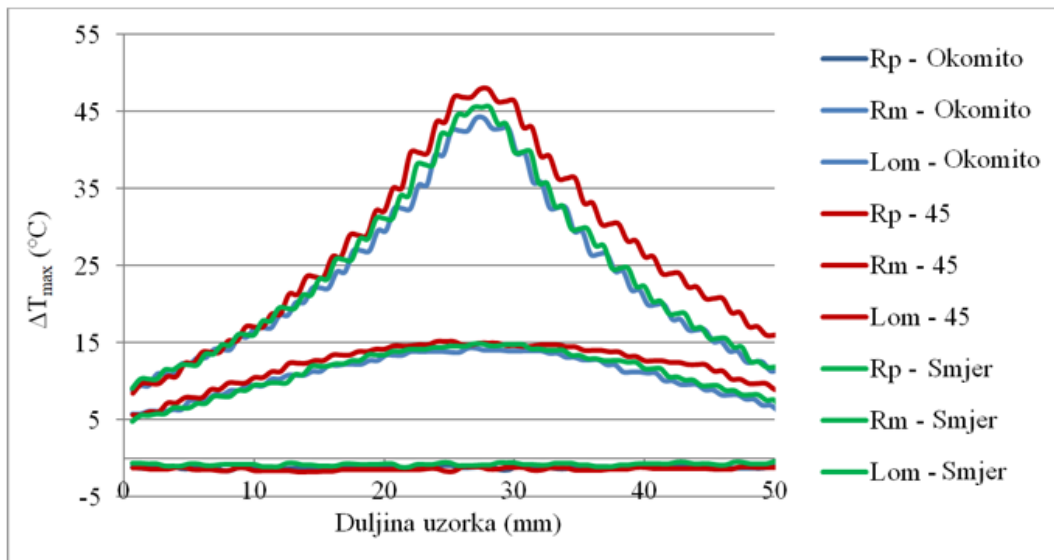
Slika 45. Termogrami uzoraka u karakterističnim točkama pri razvlačenju

Od početnog stanja uzorka, prije nego počne djelovanje sile razvlačenja, pa do točke R<sub>p</sub> odvija se elastična deformacija u cijelom području zone deformacije. Zapaža se pad temperature na termogramu. Nakon R<sub>p</sub> pa do R<sub>m</sub> odvija se plastična deformacija.

Sa termogramima, slika 45., jasno je vidljiv doprinos deformacije na promjenu temperature u zoni deformacije. Promjena temperature može se indirektno usporediti s promjenom naprezanja u zoni deformacije. Sa sva tri termograma (okomito, smjer, i 45°) u točki R<sub>m</sub> pokazuju da su naprezanja u materijalu prisutna u cijeloj zoni deformacije. S porastom sile naprezanja se koncentriraju u sredini zone deformacije. Zapaža se da je kod uzorka uzetog okomito na smjer valjanja maksimalna temperatura u centru zone deformacije niža u odnosu na uzorke uzete u smjeru i pod kutem 45° na smjer valjanja trake. Iz slike 45. se vidi da lom nastaje na mjestu maksimalnih naprezanja i da su naprezanja kod kojih nastaje lom približno jednaka.

Za detaljniju analizu raspodjele naprezanja u zoni deformacije napravljena je detaljna kvalitativna linijska analiza na svim uzorcima. Slika 46. prikazuje linijsku analizu raspodjele

promjene maksimalne temperature u zoni deformacije, u području plastičnog tečenja materijala (od  $R_p$  do  $R_m$  i kod loma uzorka).



Slika 46. Linijska analiza promjene napreznja u zoni deformacije uzoraka toplo valjane trake uzetih u različitim smjerovima u odnosu na smjer valjanja trake

Na slici 46. vidljiva je raspodjela temperature u zoni deformacije i njena promjena u području plastičnog toka materijala. Promjena temperature može se povezati s promjenama napreznja u zoni deformacije.

U točki  $R_p$ , neposredno prije početka plastičnog toka materijala, kod sva tri uzorka uzeta u različitim smjerovima u odnosu na smjer valjanja trake, raspodjela napreznja u zoni deformacije odnosno promjena temperature je skoro identična i jednaka kroz cijelu zonu deformacije. To je zapravo očekivano jer kod  $R_p$  tek započinje deformacija.

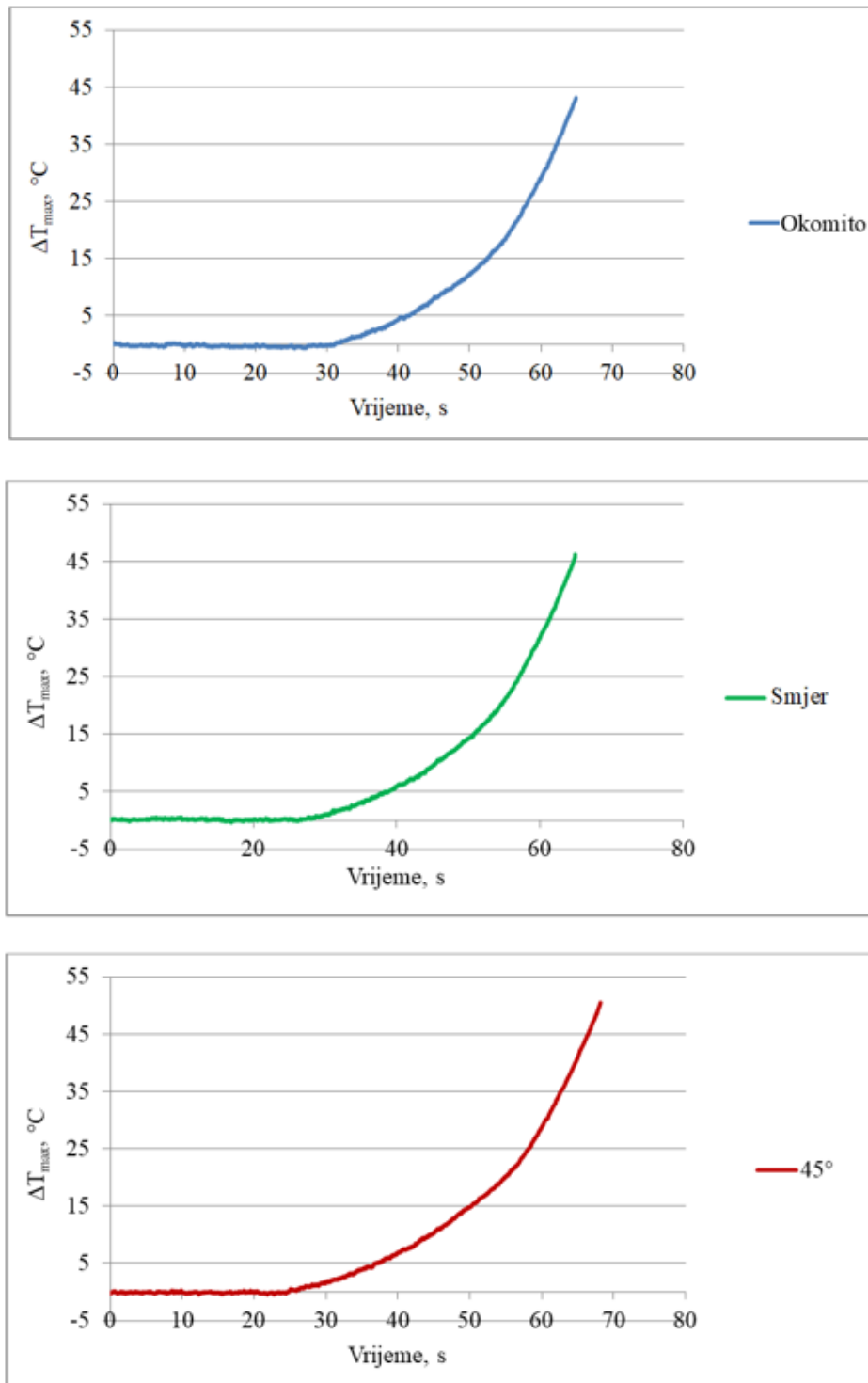
Kod točke  $R_m$ , na kraju plastičnog toka materijala, zapaža se koncentracija napreznja u sredini zone deformacije. Promjena maksimalne temperature u svim smjerovima je podjednaka. Kod uzoraka uzetih pod kutem od  $45^\circ$ , temperatura u cijeloj zoni deformacije nešto je viša.

Kod svih uzoraka neposredno prije loma uzorka napreznja se koncentriraju na mjestu loma i značajno su veća u odnosu na krajeve zone deformacije. Najveća napreznja su kod uzoraka uzetih pod kutem  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja.

Također je provedena kvantitativna analiza promjene maksimalne temperature tijekom deformacije. Dobivene vrijednosti prikazane su na slici 47. Slika pokazuje promjenu napreznja ovisno o vremenu ispitivanja.

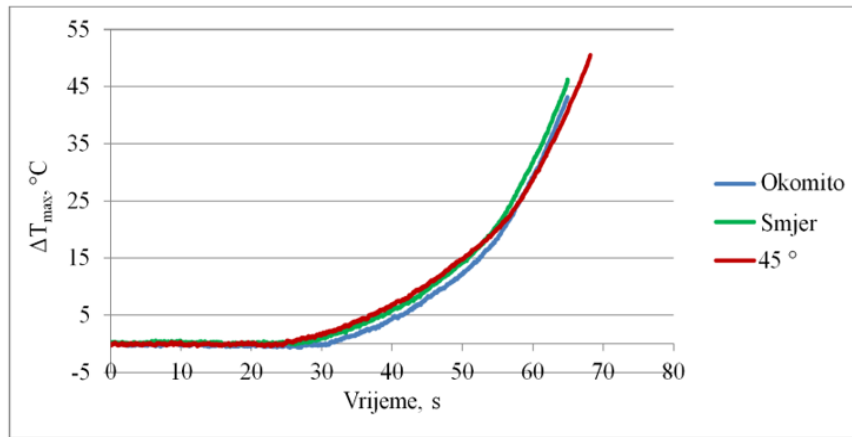
Dobiveni dijagrami sa slike 47. pokazuju kontinuirani porast promjene maksimalne temperature, odnosno napreznja nakon dostizanja početka plastičnog toka metala. Slika 48. prikazuje kvantitativnu usporedbu prikazanih dijagrama za tri različita smjera uzimanja uzoraka u odnosu na smjer valjanja trake.





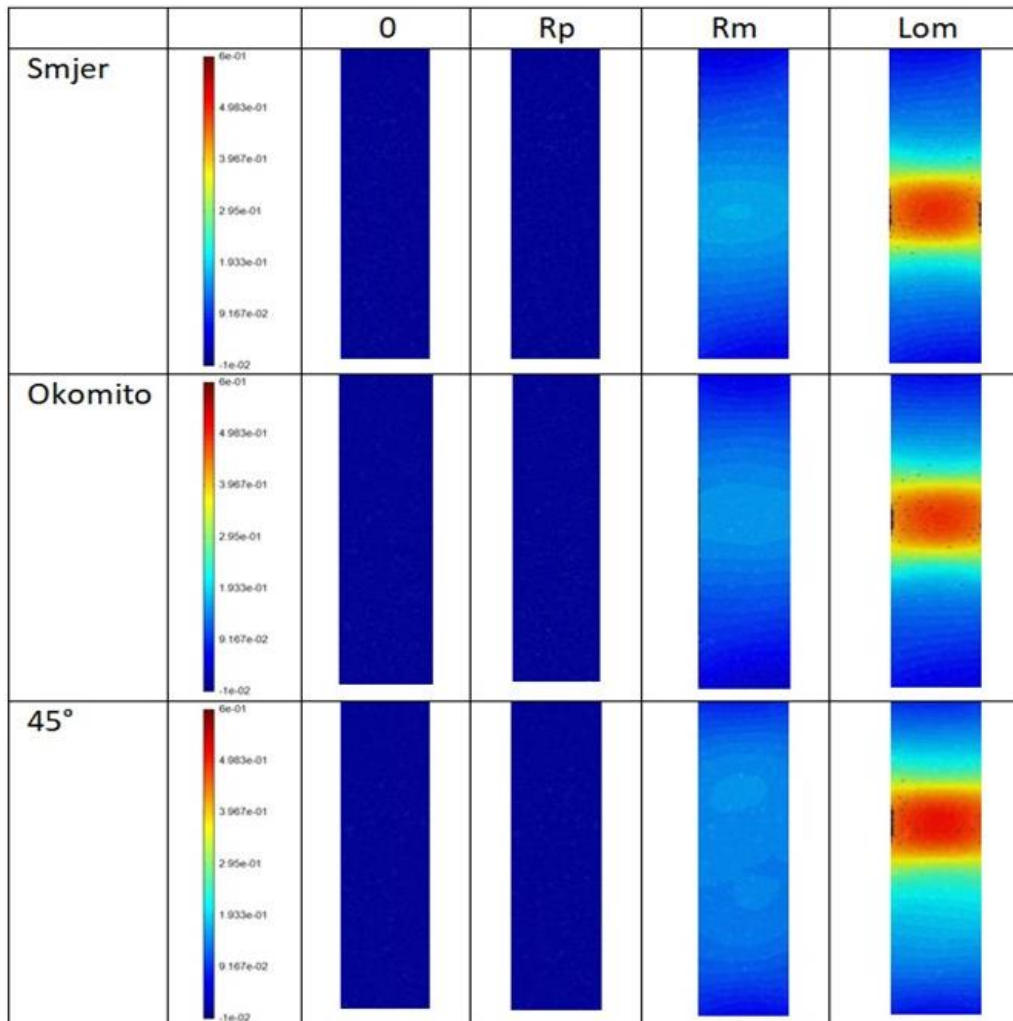
Slika 47. Dijagram promjene maksimalne temperature tijekom deformacije

Iz kvantitativnih dijagrama sa slike 48. vidljivo je da plastična deformacija najprije započinje pod kutom 45° u odnosu na smjer valjanja, zatim u smjeru valjanja, a zadnje kod uzoraka uzetih okomito na smjer valjanja. Najveći iznos promjene maksimalne temperature imaju uzorci pod kutom 45°.



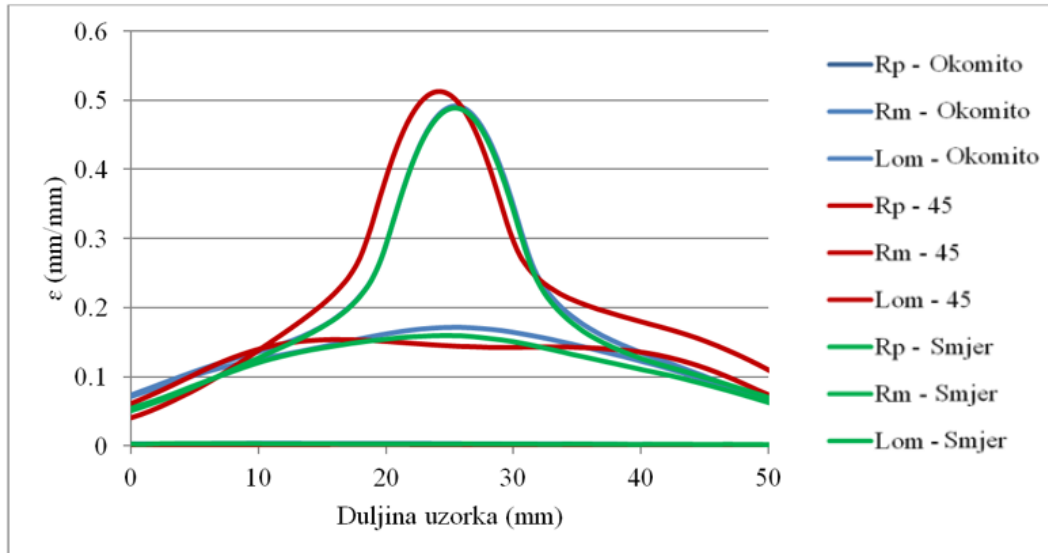
Slika 48. Dijagram promjene maksimalne temperature tijekom deformacije

Također su provedena istraživanja promjene deformacije metodom digitalne korelacije slike na uzorcima uzetim u različitim smjerovima u odnosu na smjer valjanja trake.



Slika 49. Deformacijske mape promjene raspodjele i iznosa naprezanja u karakterističnim točkama pri razvlačenju uzoraka

Slika 49. prikazuje deformacijske mape dobivene analizom u programskom paketu MatchID. Sa deformacijskih mapa moguće je vidjeti iznos i raspodjelu deformacije u zoni deformacije tijekom statičkog vlačnog pokusa u području plastične deformacije ( $R_p$  do  $R_m$ ) i lom uzorka. Slika 50. prikazuje linijsku analizu raspodjele deformacije u zoni deformacije.

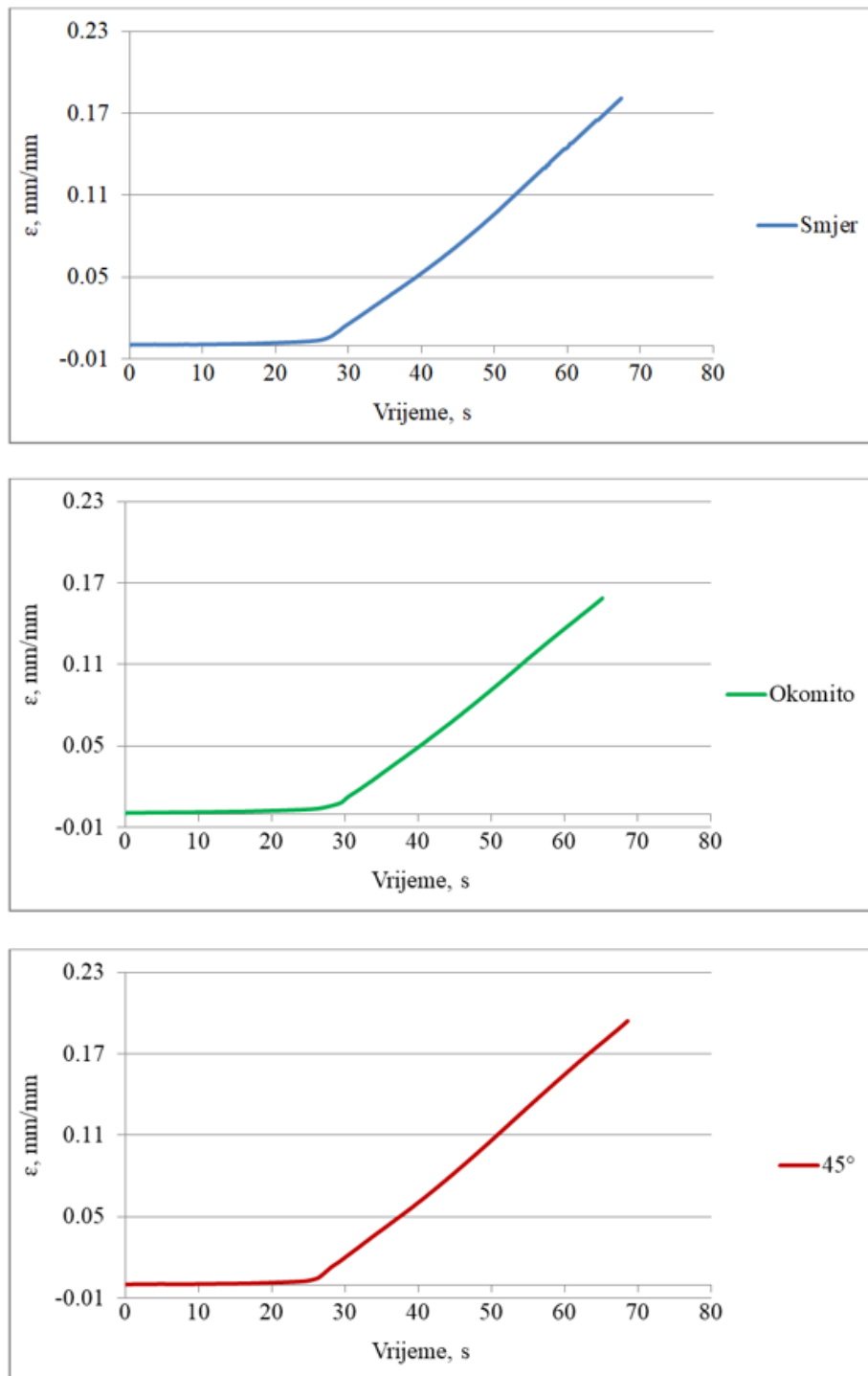


Slika 50. Linijska analiza promjene deformacije u zoni deformacije uzoraka toplovaljane trake uzetih u različitim smjerovima u odnosu na smjer valjanja trake

Na slici 50. vidljivo je da kod  $R_p$  deformacija tek započinje i za sve smjerove jednaka je 0. Kod točke  $R_m$  deformacija u smjeru i okomito na smjer valjanja trake su približno jednake, deformacija je nešto veća okomito na smjer valjanja. Deformacija je u oba smjera nešto više izražena u sredini zone deformacije. Kod  $45^\circ$  deformacije su ravnomjernije raspoređene kroz veći dio zone deformacije i maksimalna deformacija je nešto niža.

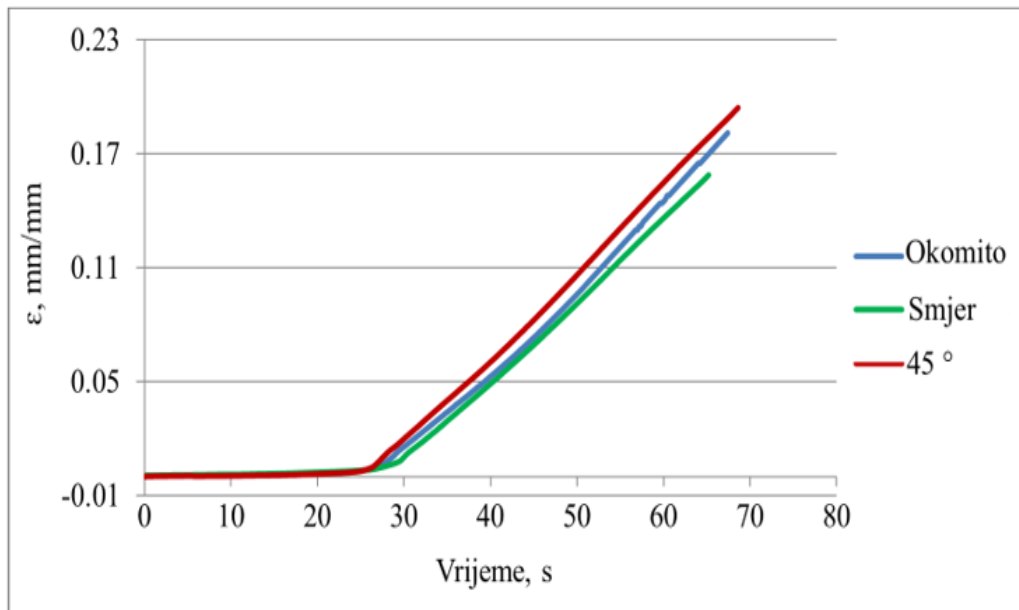
Napravljena je i kvantitativna analiza tijekom deformacije. Dobiveni rezultati prikazani su na slici 51. Usporedne vrijednosti za sva tri smjera prikazane su na slici 52.

Iz dijagrama provedene kvantitativne analize vidljivo je kako deformacija prvo započinje u uzorima uzetim u smjeru valjanja, zatim pod kutom  $45^\circ$ . Kod uzoraka koji su uzeti okomito na valjanja dolazi najkasnije do pojave deformacije.



Slika 51. Promjena deformacije obzirom na smjer uzimanja uzoraka

Na slici 52. prikazan je usporedni utjecaj smjera uzimanja uzorka na tijek i iznos deformacije u ispitivanom području.



Slika 52. Promjena deformacije obzirom na smjer uzimanja uzoraka

Iz dijagrama sa slike 52. vidljivo je kako se plastična deformacije odvija prvo u uzorcima pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja, zatim u uzorcima okomito na smjer, a u uzorcima u smjeru valjanja dolazi najkasnije do pojave plastične deformacije. Najveći iznos deformacije prije loma je u uzorcima pod kutom  $45^\circ$  i iznosi oko 0,194 mm/mm, uzorci uzeti u smjeru imaju deformaciju u iznosu 0.181 mm/mm, a uzorci uzeti okomito na smjer valjanja imaju deformaciju u iznosu 0.159 mm/mm.

Rezultati utjecaja preferencijalne orijentacije kristalnog zrna na čeliku mikrolegiranom niobijem potvrđuju rezultate dobivene u smjeru valjanja i okomito na smjer valjanja [43].

Iz provedenih ispitivanja proizišlo je da niti kvalitativno niti kvantitativno nema značajnijih razlika u ponašanju toplo valjane trake odnosno da nije zapažena anizotropija.

Prema literaturi, anizotropija se može odrediti i iz promjena u deformaciji uzorka (promjene u dimenzijama) u zoni deformacije. Najčešće se anizotropno ponašanje trake određuje prema Lankfordovom faktoru anizotropije  $r$  [33,34,44]. Za izračunavanje faktora anizotropije detaljno su mjerene promjene dimenzija ispitivanih uzoraka. Dimenzije ispitivanih uzoraka prikazana su u tablici 3.

Tablica 3. Dimenzije ispitivanih uzoraka niskougličnog čelika

Uzorak/ kut u odnosu na kut valjanja (°)	Čelik	Brzina razvlačenja, mm/min	Dimenzije uzoraka					
			a <sub>0</sub> , mm	b <sub>0</sub> , mm	L <sub>0</sub> , mm	a <sub>k</sub> , mm	b <sub>k</sub> , mm	L <sub>k</sub> , mm
1_0°	Niskouglični čelik	20	2,82	20,03	45,06	2,02	14,8	56,95
2_0°			2,79	19,74	44,51	2,01	14,73	57,11
3_0°			2,78	20,12	45,48	1,87	14,57	57,97
4_45°			2,78	20,09	45,26	2,04	14,86	57,99
5_45°			2,76	20,00	44,85	1,96	14,68	58,23
6_45°			2,80	20,02	45,24	1,81	14,52	58,72
7_90°			2,72	20,13	45,59	2,02	14,96	58,49
8_90°			2,77	20,08	45,86	2,01	14,92	59,67
8_90°			2,82	20,07	45,72	1,87	14,76	59,67

Iz rezultata prikazanih u tablici 3., prema izrazima 1, 2 i 6 izračunata je anizotropija za sva tri smjera uzimanja uzoraka toplo valjane trake.

a) Vertikalna anizotropija

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{l^* b}{l_0^* b_0}} \quad (1)$$

b) prosječna vertikalna anizotropija

$$r_s = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2)$$

c) ravninska anizotropija  $\Delta r$

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (6)$$

U tablici 4. prikazane su vrijednosti izračunate vertikalne srednje i ravninske anizotropije.

Tablica 4. Ovisnost smjera uzimanja uzoraka o faktorima anizotropije

Smjer uzimanja uzoraka	Vertikalna anizotropija (r)	Srednja anizotropija ( $r_s$ )	Ravninska anizotropija ( $\Delta r$ )
0°	7,86	5,96	0,65
45°	5,06		
90°	5,77		

Na istraživanoj traci faktor vertikalne anizotropije najviše je izražen u smjeru valjanja. Faktor srednje normalne plastične anizotropije  $r_s$ , limova i traka namijenjenih za duboko izvlačenje, nalazi se u granicama 0,8 do 6. Prema tome ispitivana toplo valjana traka bi se mogla duboko izvlačiti.

Faktor ravninske anizotropije  $\Delta r$  karakterizira deformaciju u smjeru pod određenim kutem u odnosu na smjer valjanja trake. U provedenim ispitivanjima određivana je anizotropija pod kutem od 45 °. Vertikalna anizotropija pod kutom 45° iznosila je 5,06, u smjeru valjanja iznosila je 7,86, a okomito na smjer valjanja 5,77. Ravninska anizotropija izračunata preko jednadžbe (6) iznosila je 0,65.

## 4.2 Utjecaj stupnja deformacije na anizotropno ponašanje trake tijekom deformacije

Mehanička svojstva ispitivanog niskougličnog čelika dobivena eksperimentalnim ispitivanjem prikazana su u tablici 5.

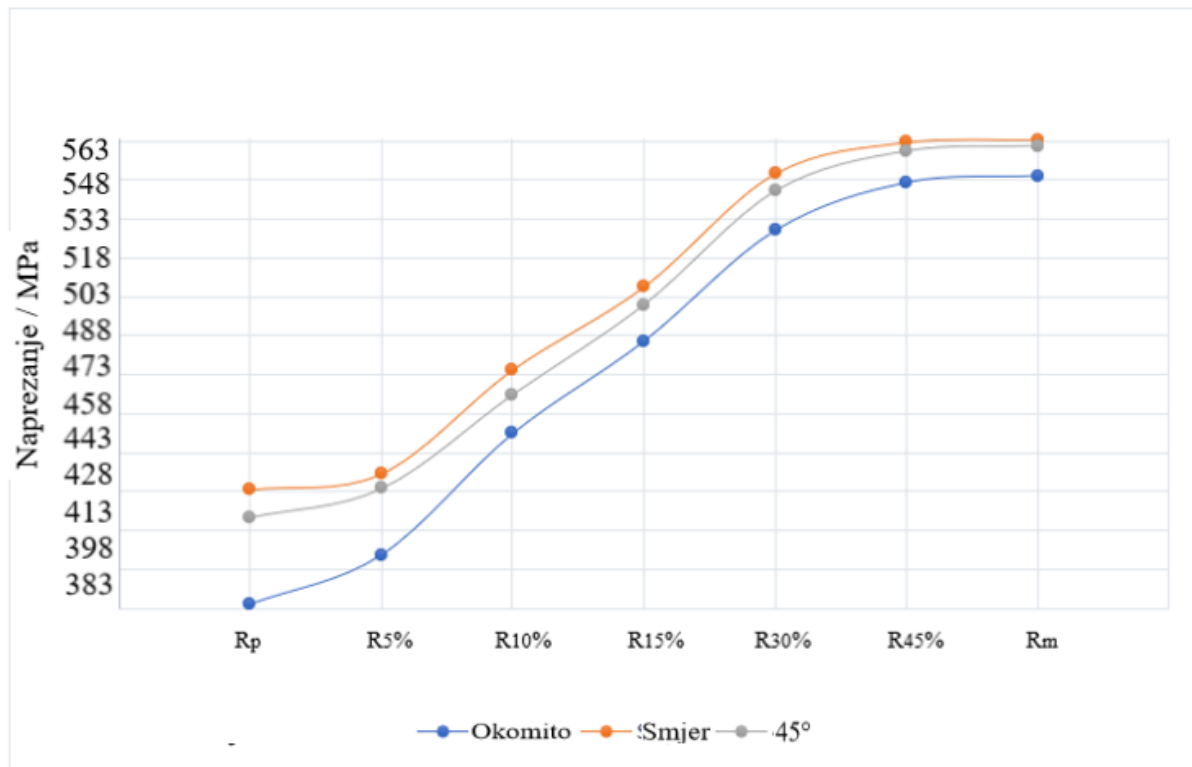
Tablica 5. Mehanička svojstva niskougličnog u odnosu na smjer valjanja

Uzorak/ kut u odnosu na kut valjanja (°)	Čelik	Brzina razvlačenja, mm/min	Mehanička svojstva						
			$R_p$ / MPa	$R_{5\%}$ , MPa	$R_{10\%}$ , MPa	$R_{15\%}$ , MPa	$R_{30\%}$ MPa	$R_{45\%}$ MPa	$R_m$ , MPa
1_0°	Niskouglični čelik	20	438,53	448,79	492,32	518,77	559,01	561,60	561,95
2_0°			425,72	429,76	472,90	510,36	543,15	560,02	562,36
3_0°			422,20	425,55	459,39	491,35	549,27	565,77	566,31
4_45°			435,97	438,75	473,08	495,68	541,55	559,90	562,8
5_45°			424,59	422,32	460,01	490,06	552,13	564,05	564,65
6_45°			393,82	426,52	462,97	513,96	537,40	553,22	555,56
7_90°			383,60	393,98	445,90	478,55	530,93	545,79	551,74
8_90°			403,51	409,24	462,57	497,35	528,37	549,75	550,75
9_90°			367,50	408,05	442,93	481,90	526,67	545,63	546,45

Provedena je analiza naprezanja ovisno o smjeru valjanja u karakterističnim točkama: granica proporcionalnosti, 5% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju, 10% deformacije

u odnosu na ukupnu deformaciju, 15% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju, 30% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju, 45% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju i vlačna čvrstoća.

Za svaku karakterističnu točku uzete su srednje vrijednosti iznosa naprezanja, obzirom na tri ispitana uzorka za svaki smjer u odnosu na smjer valjanja niskouglične trake. Na slici 53. prikazan je dijagram koji uspoređuje iznose naprezanja uzorka uzetih u smjeru valjanja, okomito i pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer. Ispitivanje je provedeno pri brzini razvlačenja 20 mm/min.

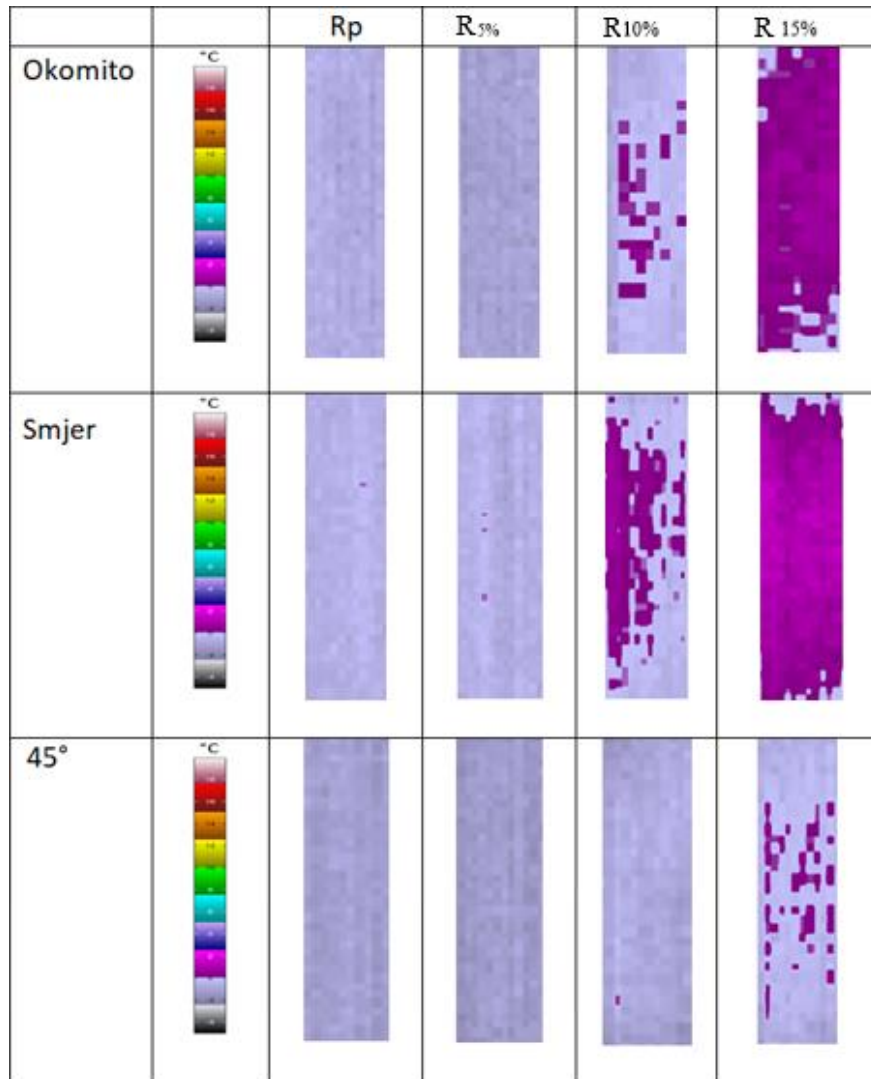


Slika 53. Naprezanje u različitim karakterističnim točkama u odnosu na smjer valjanja niskouglične trake

Iz dijagrama sa slike 53. vidljivo je kako je naprezanje u svim točkama za koje je provedena analiza, najveće u smjeru valjanja. To znači da je u tome smjeru potrebna nešto veća sila da bi se odvila deformacija ili lom. S dijagrama je vidljivo kako nešto manju vrijednost naprezanja imaju uzorci koji su uzimani pod kutom od  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja, dok najmanju vrijednost naprezanja za svaku točku interesa imaju uzorci koji su uzimani okomito na smjer valjanja.

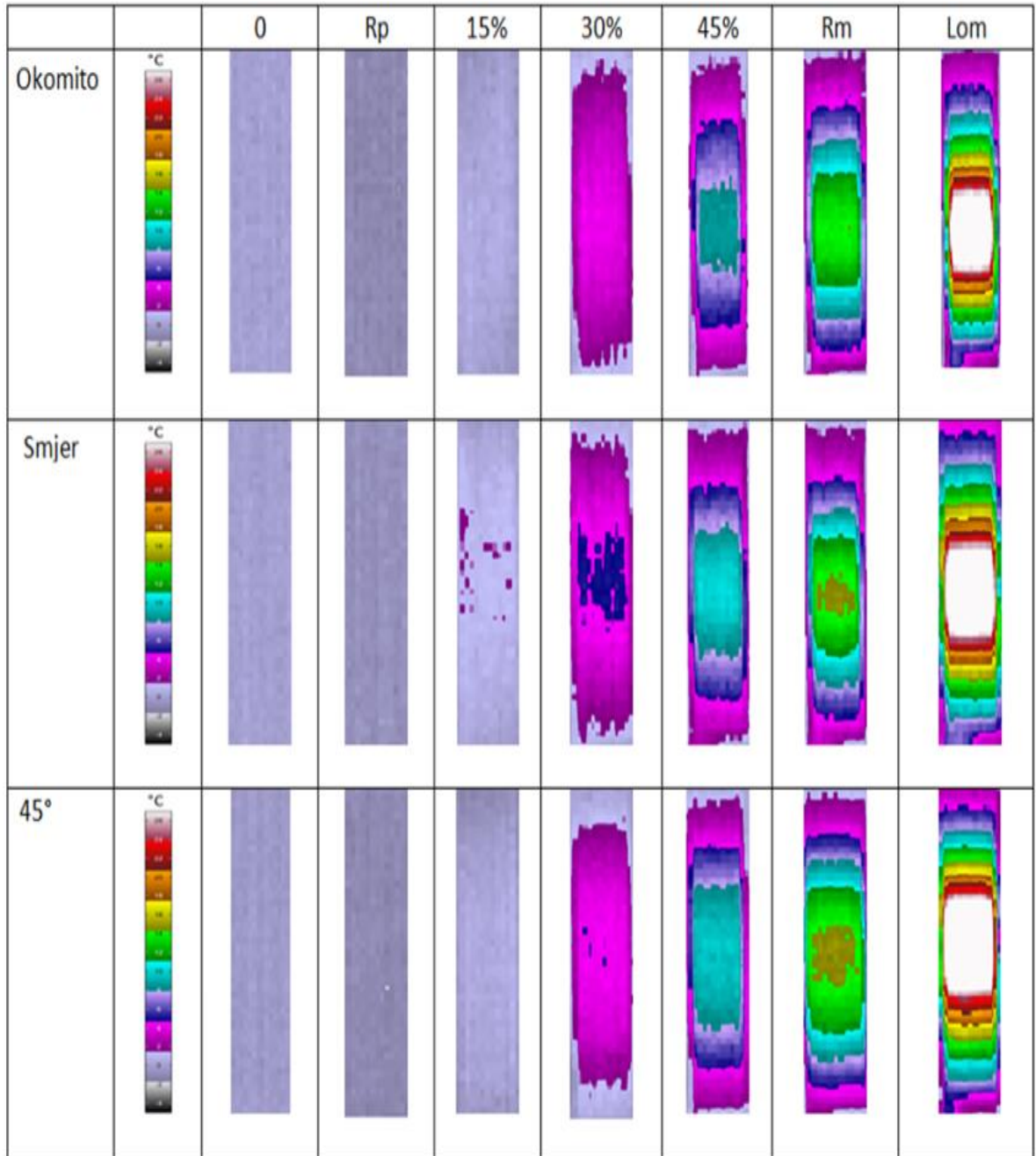
Na slici 54. prikazani su temperaturni termogrami za početak plastičnog toka ( $R_p$ ), 5% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju ( $R_{5\%}$ ), 10% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju ( $R_{10\%}$ ), 15% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju ( $R_{15\%}$ ) za tri različita smjera uzimanja uzoraka. Temperaturni termogrami prikazuju temperaturnu raspodjelu, odnosno raspodjelu naprezanja tijekom statičkog vlačnog pokusa.



Slika 54. Termogrami uzoraka pri razvlačenju kod R<sub>p</sub>, R<sub>5%</sub>, R<sub>10%</sub>, R<sub>15%</sub>

Termogrami sa slike 54. prikazuju kvalitativnu analizu promjene maksimalne temperature, odnosno naprezanja tijekom statičkog vlačnog pokusa. Sa termograma je vidljivo kako pri R<sub>p</sub> i R<sub>5%</sub> nema bitnih razlika kod promjene maksimalne temperature ni kod jednog uzorka. U točki gdje je deformacija 10% u odnosu na ukupnu deformaciju najveću promjenu maksimalne temperature imaju uzorci koji su uzimani u smjeru valjanja, dok kod uzoraka koji su uzimani pod kutom 45° u odnosu na smjer valjanja nije zabilježena značajna promjena maksimalne temperature. U točki gdje je deformacija jednaka 15% u odnosu na ukupnu deformaciju, pojavljuje se prve značajnije promjena temperature u uzorcima koji su uzimani pod kutom 45° u odnosu na smjer valjanja. Kod uzoraka koji su uzeti u smjeru i okomito na smjer valjanja naprezanje je ravnomjerno raspoređeno po cijeloj površini uzorka.

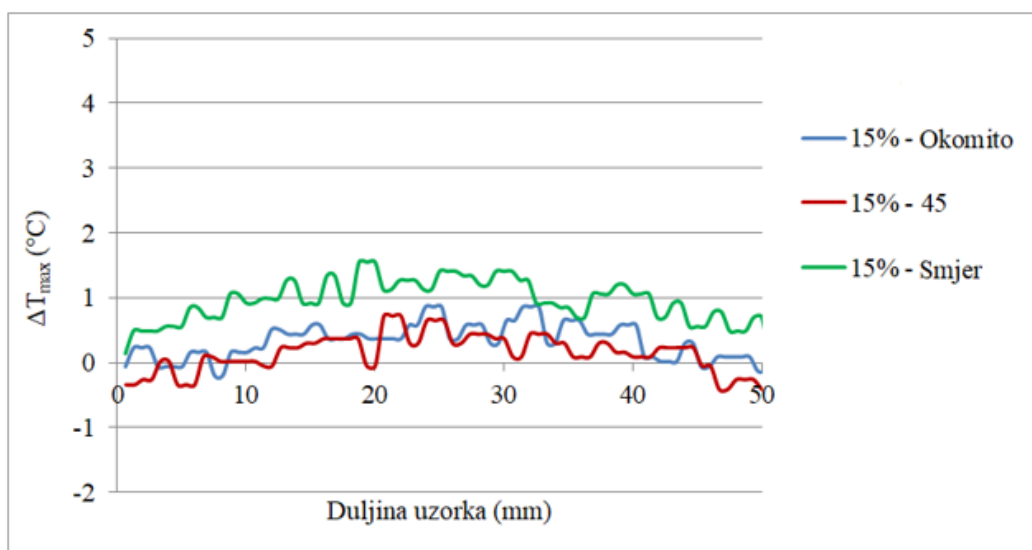
Slika 55. prikazuje termograme pri jednakoj skali za: granicu proporcionalnosti (R<sub>p</sub>), 15% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju (R<sub>15%</sub>), 30% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju (R<sub>30%</sub>), 45% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju (R<sub>45%</sub>), vlačnu čvrstoću (R<sub>m</sub>) i lom.



Slika 55. Termogrami uzoraka kod razvlačenja na granicu proporcionalnosti (R<sub>p</sub>), 15% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju (R<sub>15%</sub>), 30% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju (R<sub>30%</sub>), 45% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju (R<sub>45%</sub>) i vlačnu čvrstoću (R<sub>m</sub>) i lom

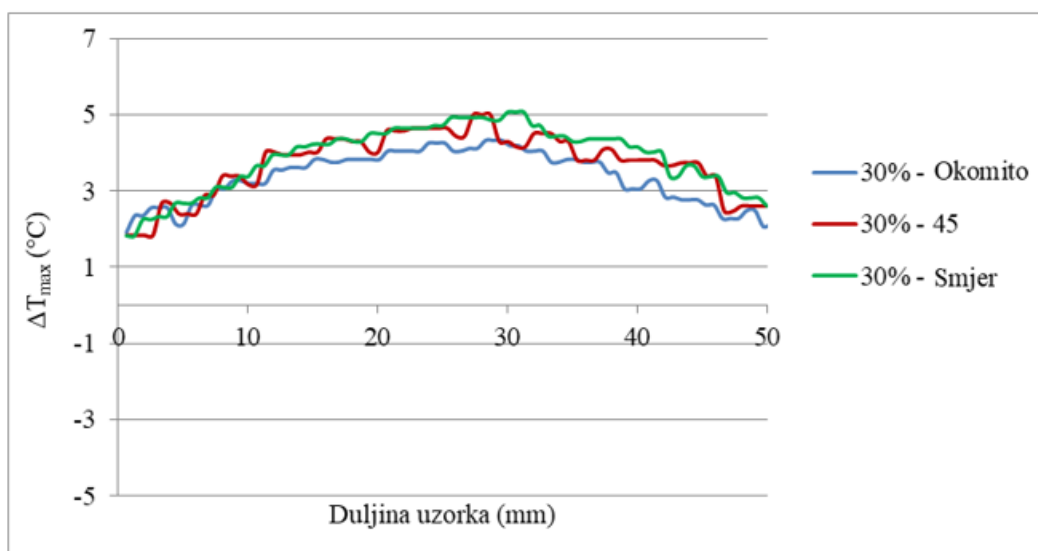
Iz termograma na slici 55. uspoređujući boje sa skalom s lijeve strane vidljivo je kako najveće naprezanje u svakoj karakterističnoj točki imaju uzorci uzeti u smjeru valjanja. Uzorci koji su uzeti pod kutem 45° u odnosu na smjer valjanja imaju nešto niži iznos naprezanja, dok uzorci koji su uzeti okomito na smjer valjanja imaju najmanje naprezanje u svim točkama. Najveći iznosi naprezanja nalaze se u sredini uzorka, gdje je došlo do loma. Termografska analiza dana slikom 55. potvrđuje dijagrame prikazane na slici 53.

Jasniju sliku raspodjele naprežanja u zoni deformacije daje linijska analiza maksimalne promjene temperature. Slika 56. prikazuje linijsku analizu u točki R<sub>15%</sub>.



Slika 56. Linijska analiza promjene maksimalne temperature duž uzorka za točku R<sub>15%</sub>

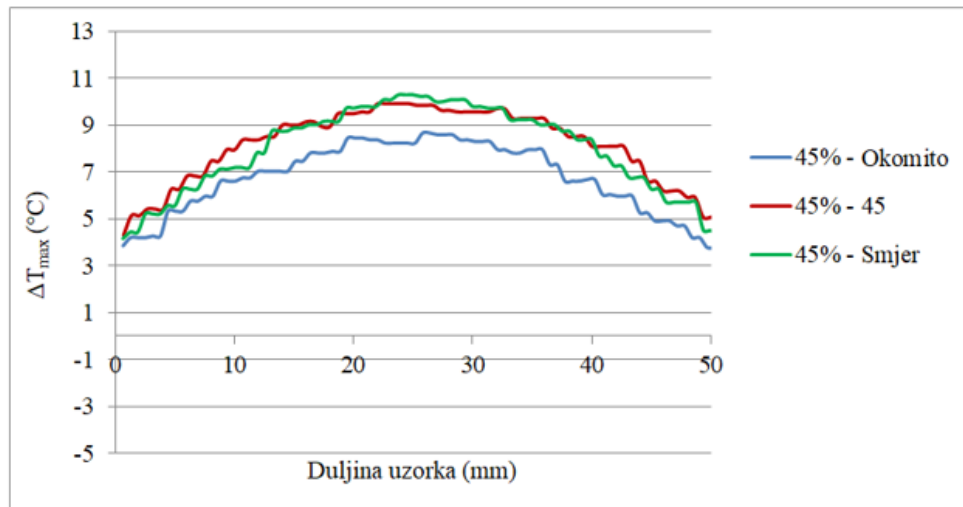
Iz dijagrama sa slike 56. vidljivo je da na samom početku plastičnog toka najveću promjenu temperature, odnosno najveće naprežanje imaju uzorci u smjeru valjanja, a najmanje uzorci pod kutom 45°. Raspodjela naprežanja je podjednaka duž uzorka. Slika 57. prikazuje maksimalnu promjenu temperature duž uzorka u točki R<sub>30%</sub>



Slika 57. Linijska analiza promjene maksimalne temperature duž uzorka za točku R<sub>30%</sub>

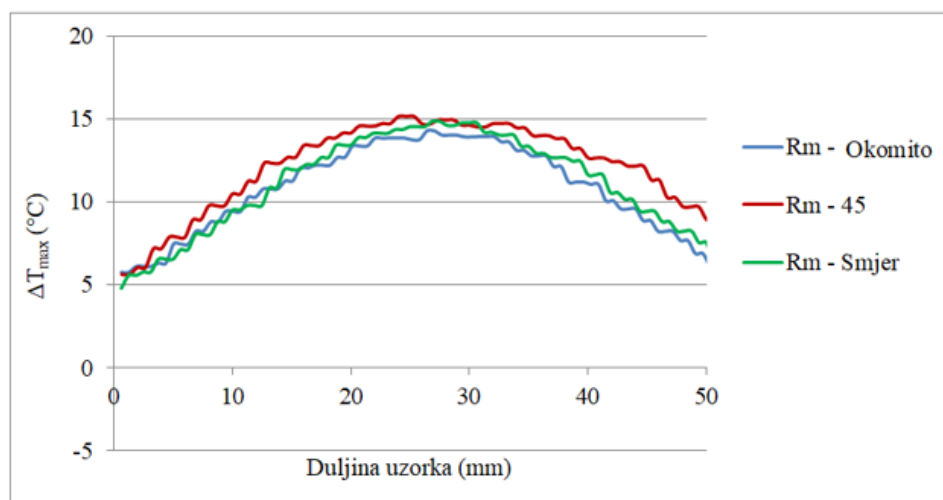
Iz dijagrama sa slike 57. vidljivo je kako najveće naprežanje duž uzorka pri točki R<sub>30%</sub> imaju uzorci u smjeru valjanja, a najmanje uzorci okomito na smjer valjanje. Prema grafu vidljivo je kako je najveće naprežanje lokalizirano u sredini uzorka, dok je na krajevima nešto

niži iznos naprežanja kod sva tri uzorka. Slika 58. prikazuje linijski analizu promjene maksimalne temperature u točki  $R_{45\%}$ .



Slika 58. Linijska analiza promjene maksimalne temperature duž uzorka za točku  $R_{45\%}$

Iz dijagrama sa slike 58. vidljivo je kako pri točki  $R_{45\%}$  uzorci u smjeru valjanja i pod kutom  $45^\circ$  imaju podjednako naprežanje duž uzorka. Uzorci u smjeru valjanja imaju nešto više naprežanje u sredini uzorka, dok uzorci pod kutom  $45^\circ$  imaju veći iznos naprežanja na lijevom i desnom kraju uzorka. Uzorci okomito na smjer valjanja imaju duž cijelog uzorka najmanju promjenu maksimalne temperature, odnosno naprežanja. Slika 59. prikazuje linijsku analizu promjene maksimalne temperature u točki  $R_m$

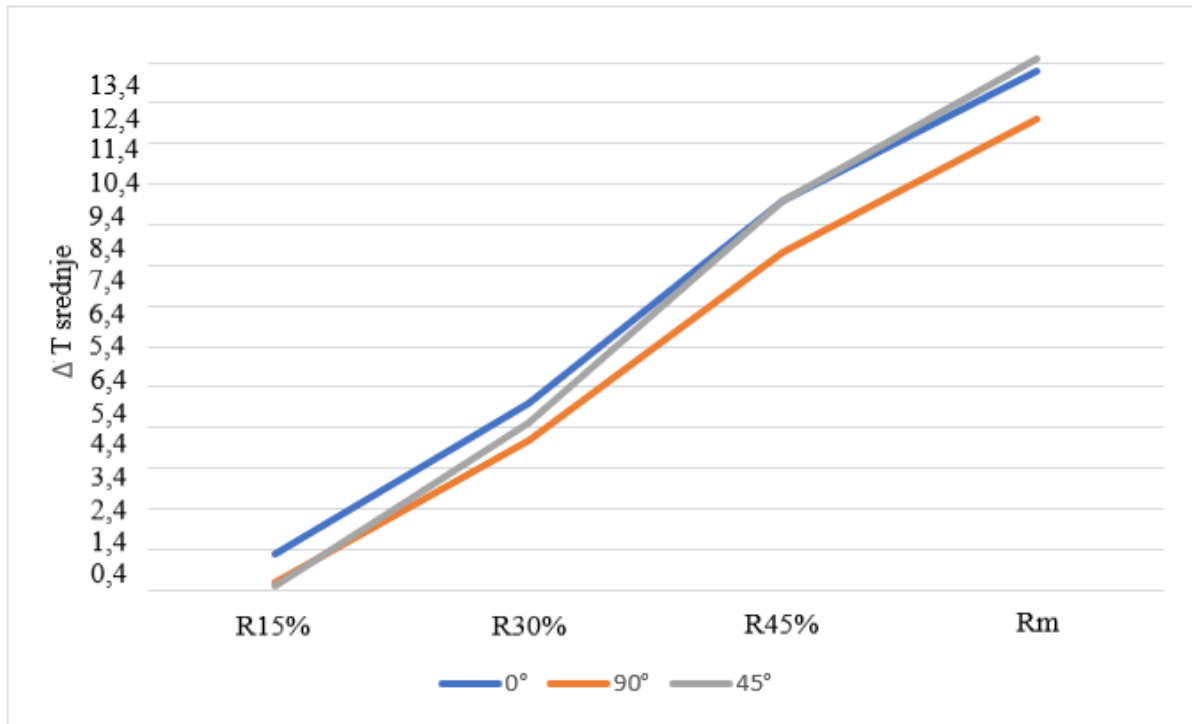


Slika 59. Linijska analiza promjene maksimalne temperature duž uzorka za točku  $R_m\%$

Iz dijagrama sa slike 59. vidljivo je kako u točki  $R_m$  najveći iznos naprežanja duž uzorka imaju uzorci pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja, a najmanji iznos naprežanja uzorci okomito na smjer valjanja. Linijskom analizom sa slika 56., 57., 58. i 59., potvrđeni su

termogramima sa slike 55. Lokalizacija naprežanja je najveća u srednjem dijelu uzorka. U svakoj karakterističnoj točki uzorci pod kutom  $45^\circ$  i u smjeru valjanja imaju veći iznos naprežanja u odnosu na uzorke okomito na smjer valjanja.

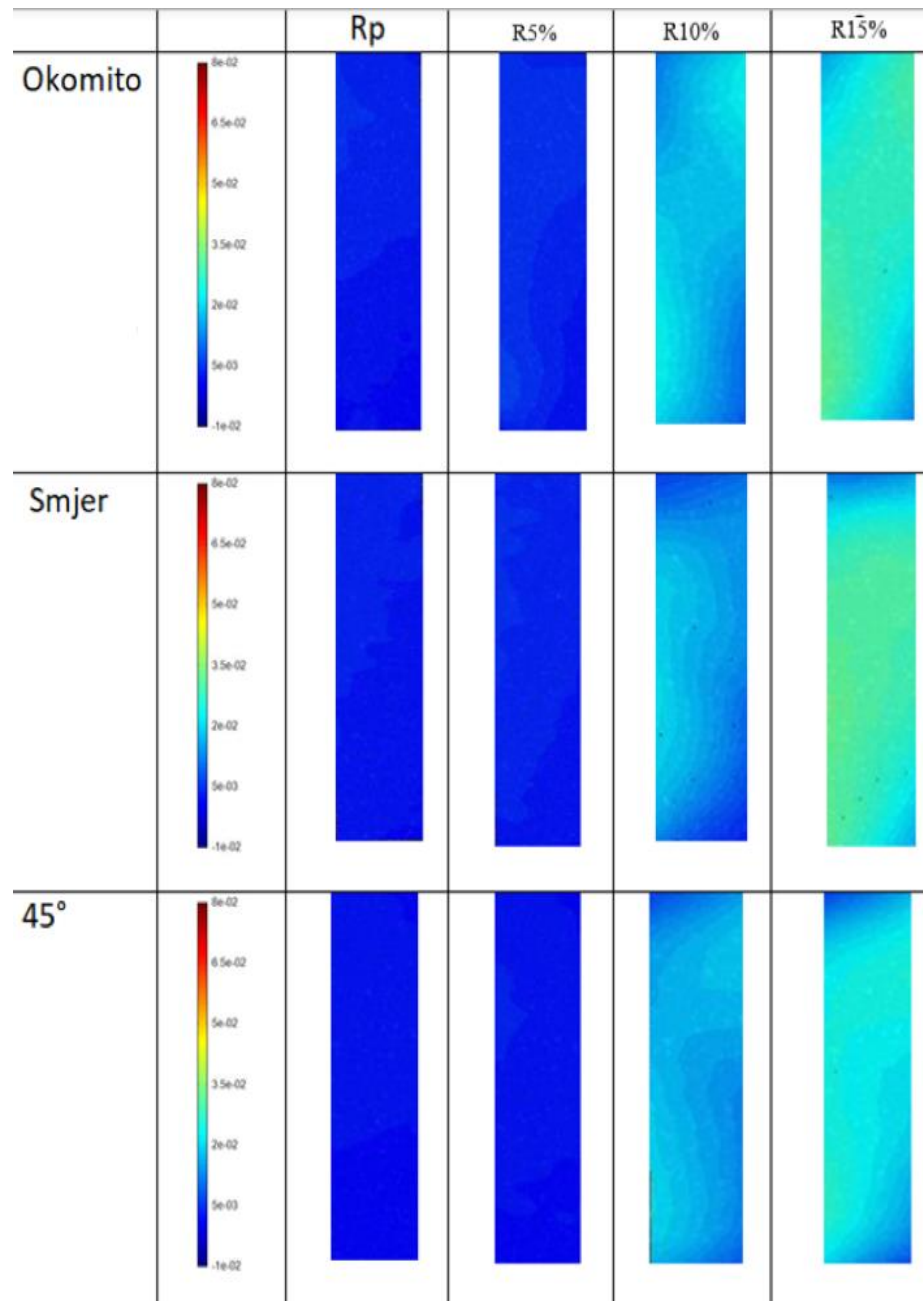
Iz dijagrama sa slika 56., 57., 58. i 59. uzete su srednje vrijednosti maksimalne promjene temperature u uzorku, te je napravljen dijagram ovisnosti promjene maksimalne temperature ovisno o smjeru uzimanja uzoraka za točke  $R_{15\%}$ ,  $R_{30\%}$ ,  $R_{45\%}$  i  $R_m$ . Dijagram je prikazan na slici 60.



Slika 60. Srednja vrijednost maksimalne promjene temperature ovisno o smjeru uzimanja uzorka za točke:  $R_{15\%}$ ,  $R_{30\%}$ ,  $R_{45\%}$ ,  $R_m$

Iz dijagrama sa slike 60. može se zaključiti da rezultati dobiveni aproksimacijom promjene maksimalne temperature tijekom plastičnog toka materijala, rastu skoro linearno tijekom deformacije za uzorke uzete u smjeru i okomito na smjer valjanja trake. Kako je već rečeno temperatura a time i naprežanja u materijalu su veća kod uzoraka uzetih u smjeru valjanja trake. Kod uzoraka uzetih okomito na smjer valjanja trake na početku plastičnog toka su naprežanja jednaka kao i kod uzoraka uzetih pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja trake. Povećanjem stupnja deformacije naprežanja u uzorcima pod kutom  $45^\circ$  rastu brže nego kod uzoraka u smjeru i okomito na smjer valjanja trake. Kod deformacije  $R_{45\%}$  naprežanje u uzorcima pod kutom  $45^\circ$  jednako je kao i kod uzoraka u smjeru valjanja, a kod  $R_m$  naprežanje u uzorcima pod kutom  $45^\circ$  ima najveću vrijednost. Može se zaključiti da raspodjela naprežanja u zoni deformacije tijekom hladne deformacije uzoraka uzetim u različitim smjerovima u odnosu na smjer valjanja trake nije jednaka. To znači da smjer valjanja trake utječe na anizotropno ponašanje iste tijekom hladne deformacije.

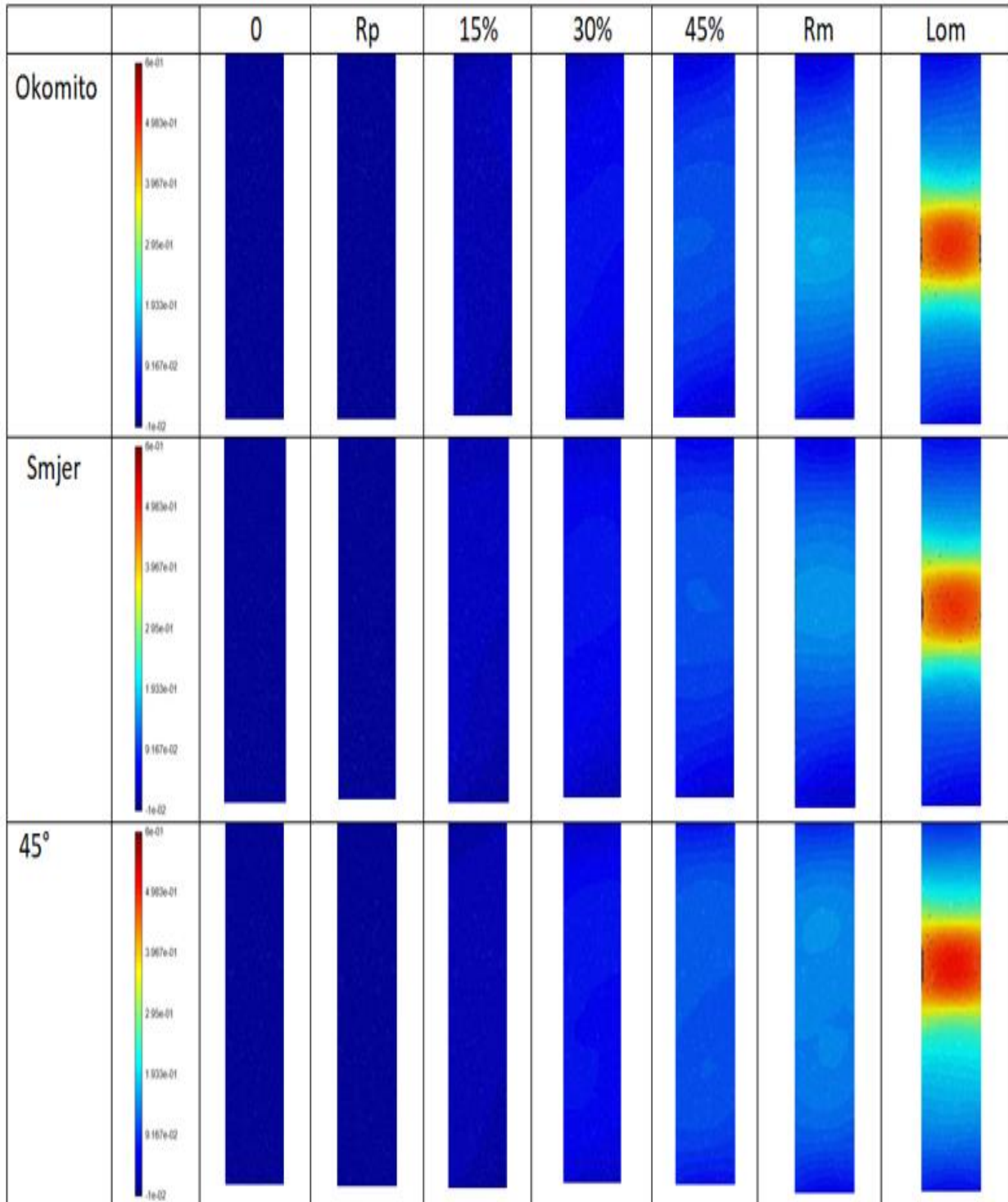
Kako bi se dobila kvantitativna i kvalitativna analiza iznosa i raspodjele deformacije tijekom statičkog vlačnog pokusa koristila se metoda digitalne korelacije slike. Slika 61. prikazuje deformacijske mape za sam početak plastične deformacije ( $R_p$ ,  $R_{5\%}$ ,  $R_{10\%}$ ,  $R_{15\%}$ ).



Slika 61. Deformacijske mape promjene raspodjele i iznosa naprezanja u karakterističnim točkama pri razvlačenju uzorka ( $R_p$ ,  $R_{5\%}$ ,  $R_{10\%}$  i  $R_{15\%}$ ) kod tri različita smjera uzimanja uzoraka

Sa slike 61. vidljivo je kako na samom početku plastične deformacije nema značajnijih razlika u raspodjeli i iznosi deformacije kod nijednog smjera uzimanja uzoraka. U točki  $R_{15\%}$  uzorci uzeti u smjeru valjanja imaju malo veći iznos deformacije prema skali sa lijeve strane u usporedbi sa uzorcima pod kutom  $45^\circ$  i okomito na smjer valjanja.

Slika 62. prikazuje deformacijske mape za točke granica proporcionalnosti ( $R_p$ ), 15% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju ( $R_{15\%}$ ), 30% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju ( $R_{30\%}$ ), 45% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju ( $R_{45\%}$ ), vlačna čvrstoća ( $R_m$ ).

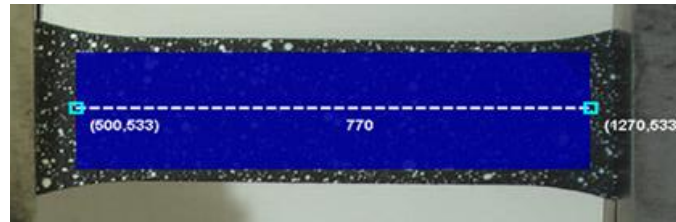


Slika 62. Deformacijske mape promjene raspodjele i iznosa naprezanja za granicu proporcionalnosti ( $R_p$ ), 15% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju ( $R_{15\%}$ ), 30% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju ( $R_{30\%}$ ), 45% deformacije u odnosu na ukupnu deformaciju ( $R_{45\%}$ ) i vlačna čvrstoću ( $R_m$ ) i lom kod tri različita smjera uzimanja uzoraka

Dobivene deformacijske mape za tri različita smjera u odnosu na smjer valjanja, ne pokazuju bitne razlike u iznosima i rasporedu deformacije na uzorku tijekom statičkog vlačnog

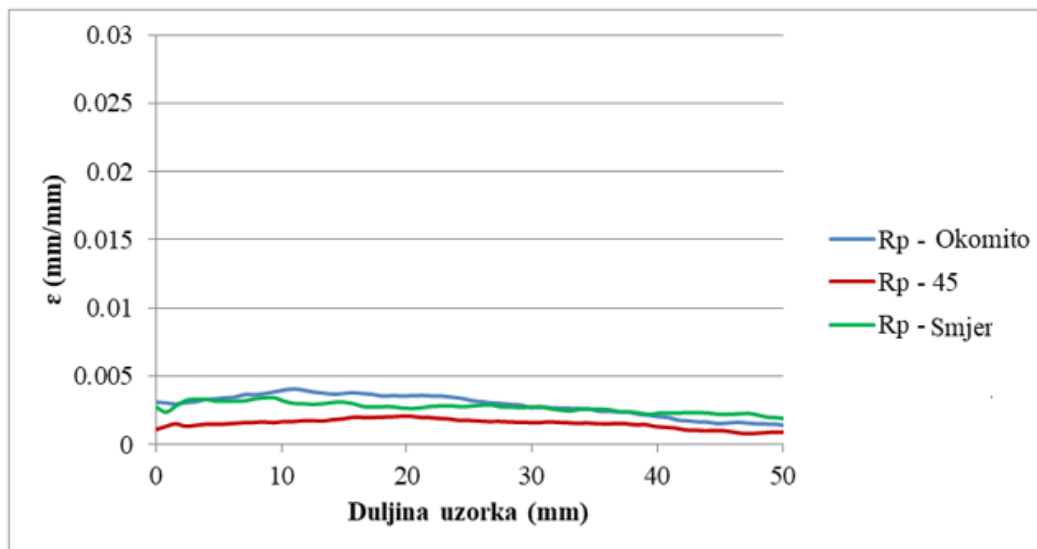
pokusa. U svim točkama za koje se napravila analiza ( $R_p$ ,  $R_{15\%}$ ,  $R_{30\%}$ ,  $R_{45\%}$ ,  $R_m$  i lom) raspodjela deformacija i iznos deformacije približno su jednaki za sva tri ispitivana smjera.

Provedena je linijska analiza kako bi se jasnije dobila slika o raspodjeli i iznosu deformacije kod tri različita smjera uzimanja uzoraka. Način provođenja linijske analize uzoraka metodom digitalne korelacije slike prikazan je na slici 63.



Slika 63. Linijska analiza promjene iznosa deformacije duž ispitnog uzorka

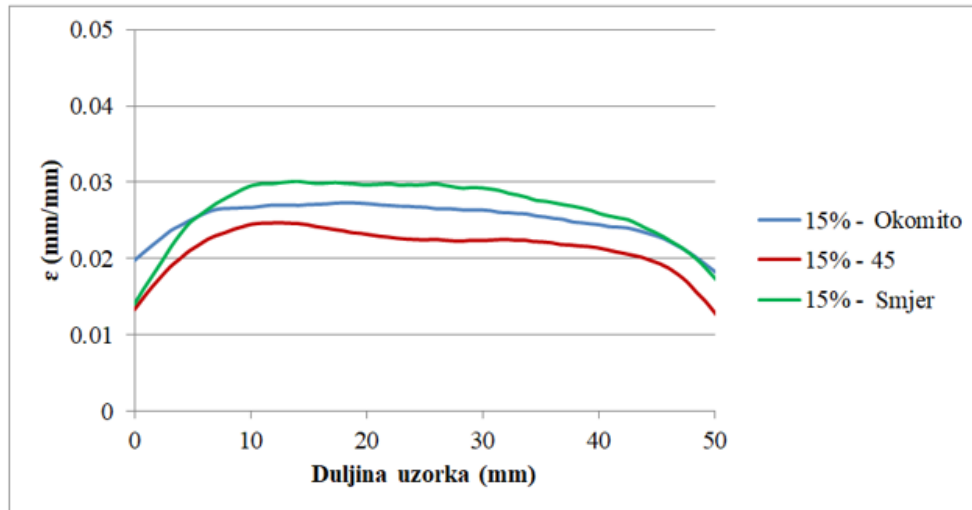
Linijska analiza utjecaja smjera uzimanja uzoraka na iznos i raspodjelu deformacije duž ispitnog uzorka za točku  $R_p\%$  prikazana je na slici 64.



Slika 64. Linijska analiza promjene deformacije duž ispitnog uzorka za točke  $R_p$

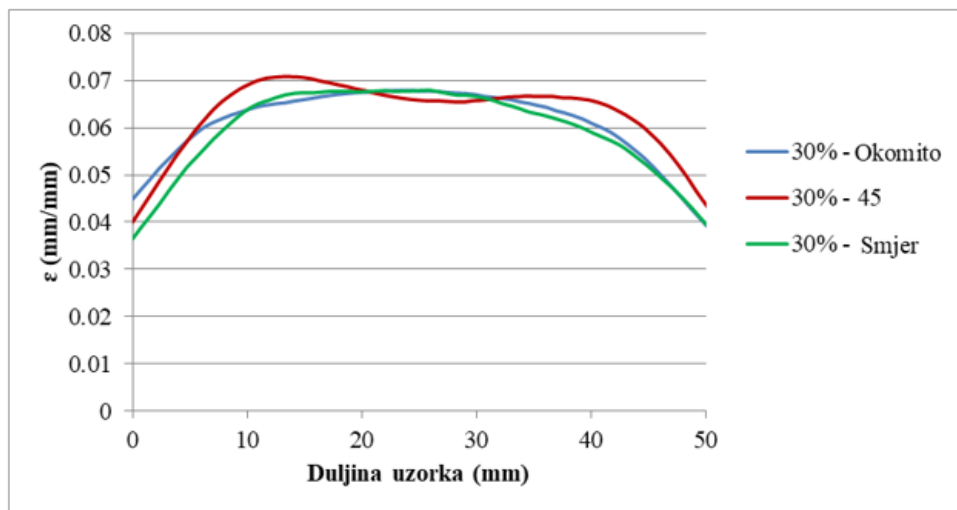
Iz dijagrama sa slike 64. vidljivo je kako je deformacija u točki  $R_p$  kod sva tri smjera ravnomjerno raspoređena duž uzorka. Najveći iznos deformacije imaju uzorci okomito na smjer valjanja, te uzorci u smjeru valjanja. Najmanji iznos deformacije imaju uzorci pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja. Na slici 65. prikazana je linijska analiza iznosa i raspodjele deformacije duž uzorka u točki  $R_{15\%}$ .





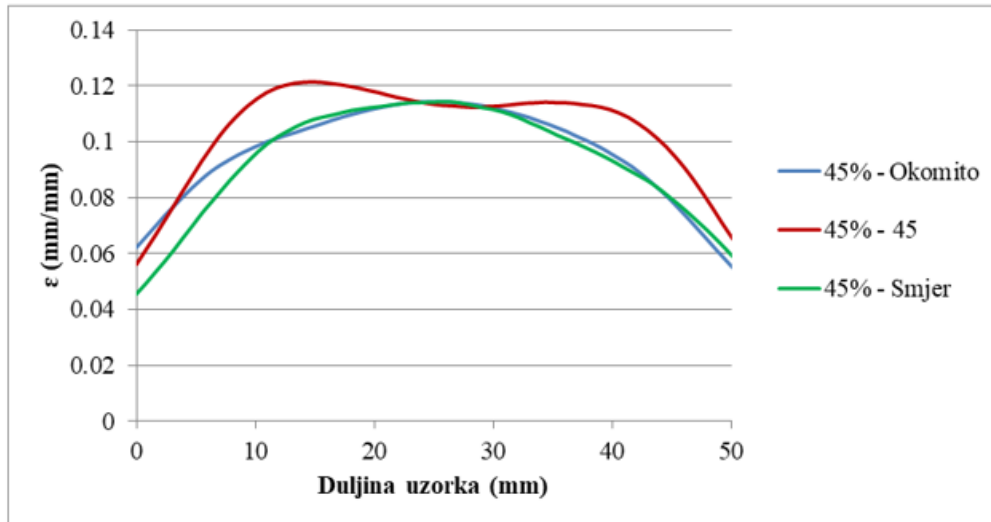
Slika 65. Linijska analiza promjene deformacije duž ispitnog uzorka za točke  $R_{15\%}$

Iz dijagrama sa slike 65. vidljivo je da najveći iznos deformacije u točki  $R_{15\%}$  imaju uzorci u smjeru valjanja, a najmanji iznos uzorci pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja. Slika 66. prikazuje linijsku analizu iznosa i raspodjele deformacije duž uzorka u točki  $R_{30\%}$ .



Slika 66. Linijska analiza promjene deformacije duž ispitnog uzorka za točke  $R_{30\%}$

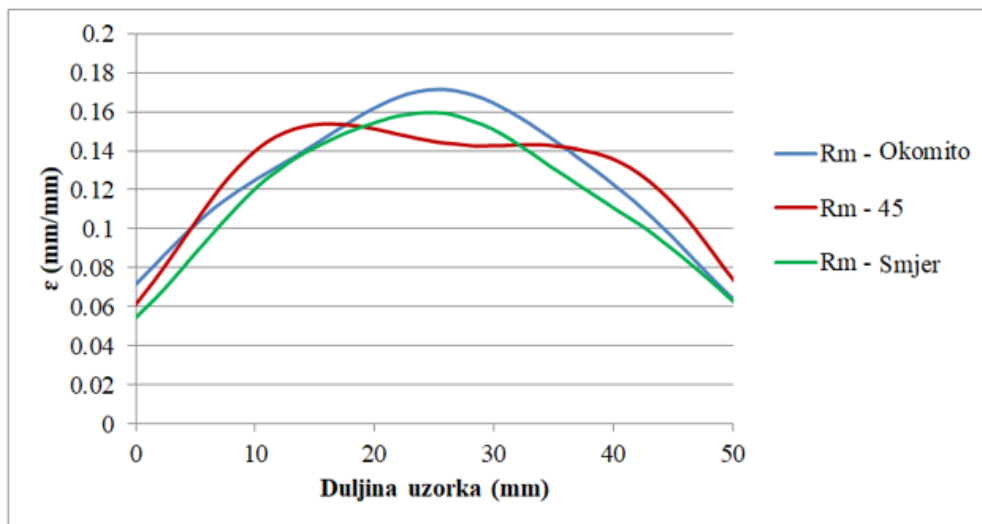
Iz dijagrama sa slike 66. vidljivo je kako u točki  $R_{30\%}$  dolazi do prve pojave nehomogene lokalizacije deformacije. U sredini uzorka najveći iznos deformacije imaju uzorci u smjeru i okomito na smjer valjanja, dok kod uzoraka uzimanih pod kutom  $45^\circ$  lokalizacija deformacije je u dva dijela uzorka, prema ispitnim glavama uzorka. Na slici 67. prikazana je linijska analiza iznosa i raspodjele deformacije duž uzorka u točki  $R_{45\%}$ .



Slika 67. Linijska analiza promjene deformacije duž ispitnog uzorka za točke  $R_{45\%}$

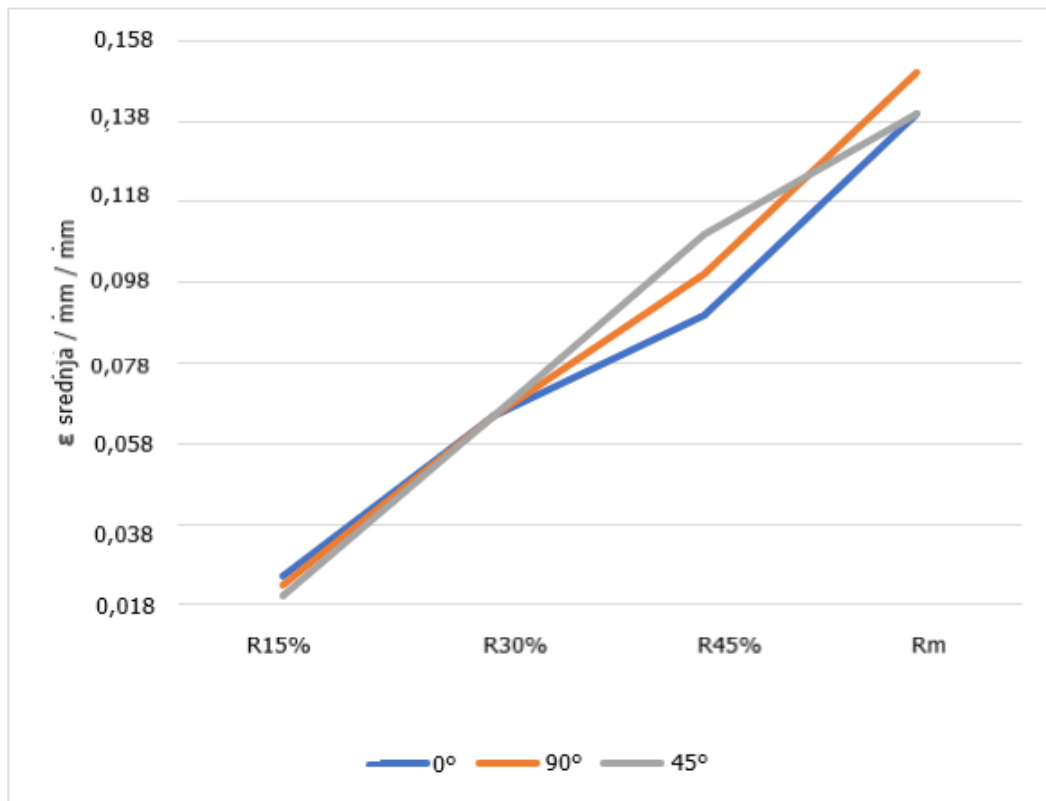
Iz dijagrama sa slike 67. ponovo je vidljiva nehomogena raspodjela deformacije duž uzorka. Raspodjela deformacije je slična kao i na slici 48. međutim s izraženijim razlikama u iznosima deformacija. Na slici 68. prikazana je linijska analiza iznosa i raspodjele deformacije duž uzorka u točki  $R_m$ .

Iz dijagrama sa slike 68. vidljivo je kako u točki  $R_m$  najveći iznos deformacije imaju uzorci okomito na smjer valjanja, zatim uzorci u smjeru valjanja. U tim uzorcima najveći iznos deformacije lokaliziran je u srednjem dijelu uzorka. Uzorci pod kutom  $45^\circ$  imaju najmanji iznos deformacije, a najveći iznos deformacije lokaliziran je na lijevom kraju uzorka.



Slika 68. Linijska analiza promjene deformacije duž ispitnog uzorka za točke  $R_m$

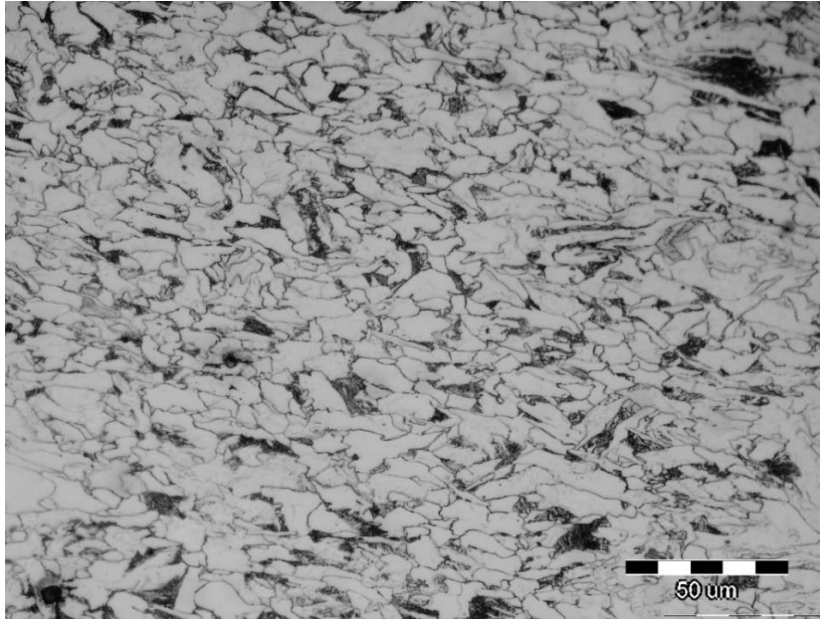
Iz dijagrama sa slika 65., 66., 67. i 68. uzete su srednje vrijednosti maksimalne deformacije duž uzorka, te je napravljen dijagram ovisnosti promjene deformacije u ovisnosti za smjer uzimanja uzoraka za točke  $R_{15\%}$ ,  $R_{30\%}$ ,  $R_{45\%}$  i  $R_m$ .



Slika 69. Srednja promjena deformacije ovisno o smjeru uzimanja uzorka za točke: R<sub>15%</sub>, R<sub>30%</sub>, R<sub>45%</sub>, R<sub>m</sub>

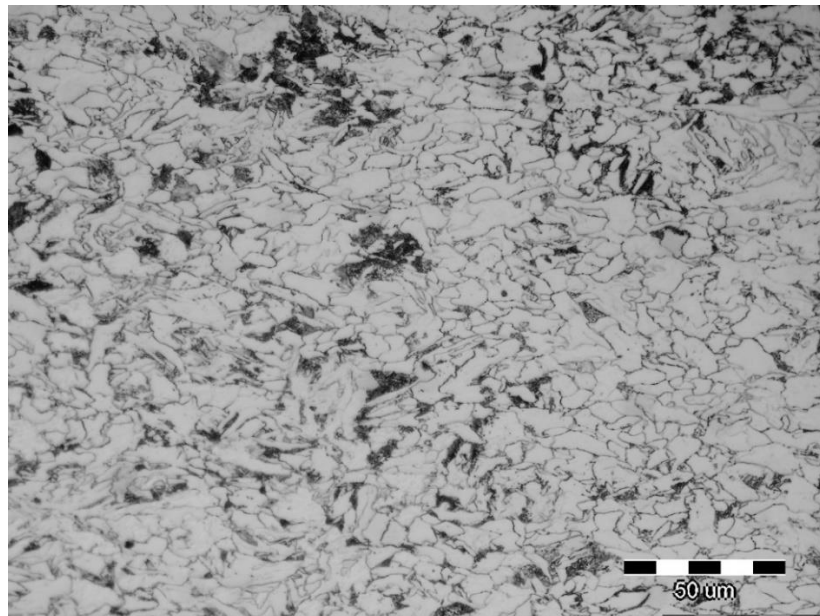
Iz dijagrama sa slike 69. vidljivo je kako na početku plastičnog toka u točki R<sub>15%</sub> najveći iznos srednje vrijednosti deformacije imaju uzorci u smjeru valjanja, a najmanju uzorci pod kutom 45°, u točki R<sub>30%</sub> svi uzorci imaju približno jednak iznos srednje deformacije duž uzorka. Najveća razlika je u točki R<sub>45%</sub> gdje najveći iznos srednje vrijednosti maksimalne deformacije imaju uzorci pod kutom 45°, a najmanji iznos uzorci u smjeru valjanja. U točki R<sub>m</sub> najveći iznos srednje vrijednosti maksimalne deformacije imaju uzorci okomito na smjer valjanja, dok uzorci pod kutom 45° i u smjeru valjanja imaju nešto manji iznos srednje vrijednosti maksimalne deformacije. Može se zaključiti da smjer valjanja trake ne utječe na iznos deformacija do ukupne deformacije od 30%, a nakon toga, do R<sub>m</sub>, zapažene su značajne razlike u ponašanju materijala tijekom hladne deformacije.

Kako bi se ispitala mikrostruktura nakon loma uzorci su izrezani iz pokidanih epruveta nakon provedenog statičkog vlačnog ispitivanja. Način na koji su izrezani uzorci prikazan je na slici 34. Slika 70. prikazuje mikrostrukturu nakon statičkog vlačnog ispitivanja uzorka u smjeru valjanja. Uzorak je izrezan na području najbližem području loma. Mikrostruktura je snimljena optičkim mikroskopom povećanjem 500x.

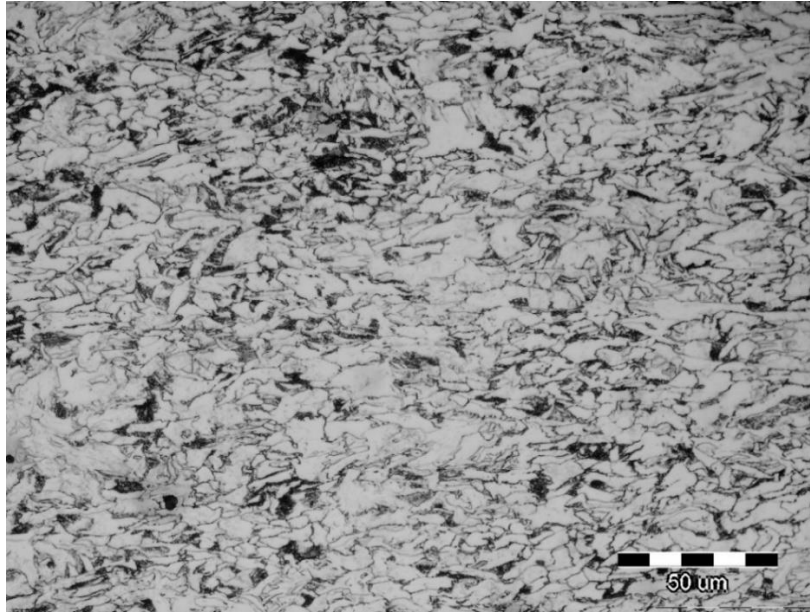


Slika 70. Mikrostruktura niskougličnog čelika na mjestu najbližem mjestu loma, u smjeru valjanja, nakon statičkog vlačnog ispitivanja

Sa slike 70. vidljivo je kako su feritna zrna puno usmjerenija i izduženija nego kod početne mikrostrukture. Slika 71. prikazuje mikrostrukturu nakon statičkog vlačnog ispitivanja uzorka uzetog pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja. Slika 72. prikazuje mikrostrukturu uzorka okomito na smjer valjanja nakon statičkog vlačnog ispitivanja.

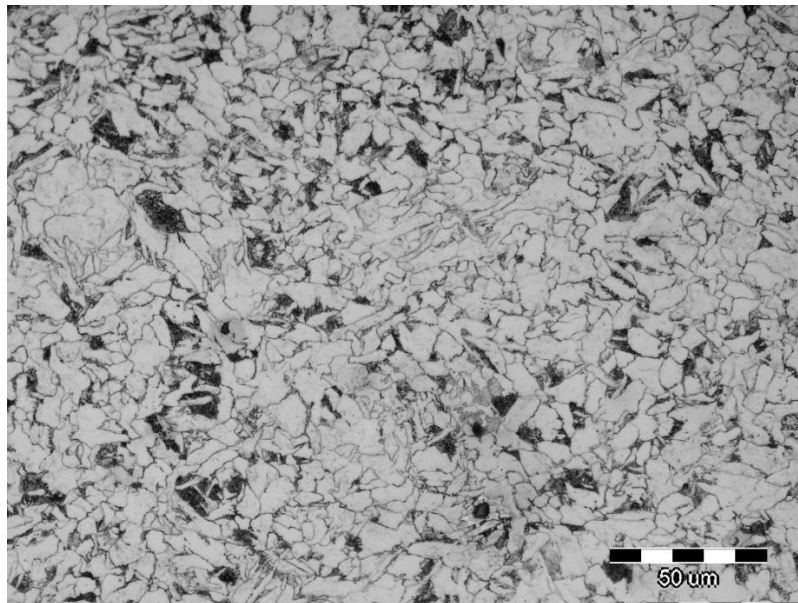


Slika 71. Mikrostruktura niskougličnog čelika na mjestu najbližem mjestu loma, pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja, nakon statičkog vlačnog ispitivanja



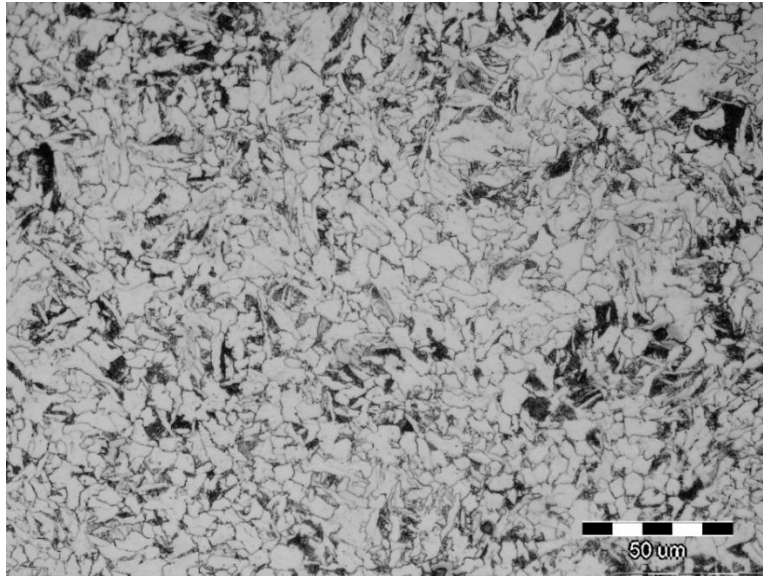
Slika 72. Mikrostruktura niskougličnog čelika na mjestu najbližem mjestu loma, okomito na smjer valjanja, nakon statičkog vlačnog ispitivanja

Usporedbom slika 70., 71. i 72. može se zaključiti kako nakon statičkog vlačnog pokusa na mjesto najbližem lomu uzorka najveću usmjerenost i veličinu perlitnog zrna imaju uzorci u smjeru valjanja, dok najmanju usmjerenost i veličinu zrna imaju uzorci okomito na smjer valjanja. Uzorci izrezani pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja imaju nešto nižu usmjerenost od uzoraka u smjeru valjanja, a nešto više od uzorka okomito na smjer valjanja. Također napravljena su mikrostrukturalna ispitivanja mikrostrukture sva tri uzorka na mjestu najdaljem od mjesta loma, kao što je prikazano na slici 34. Slika 73. prikazuje mikrostrukturu niskougličnog čelika u smjeru valjanja.

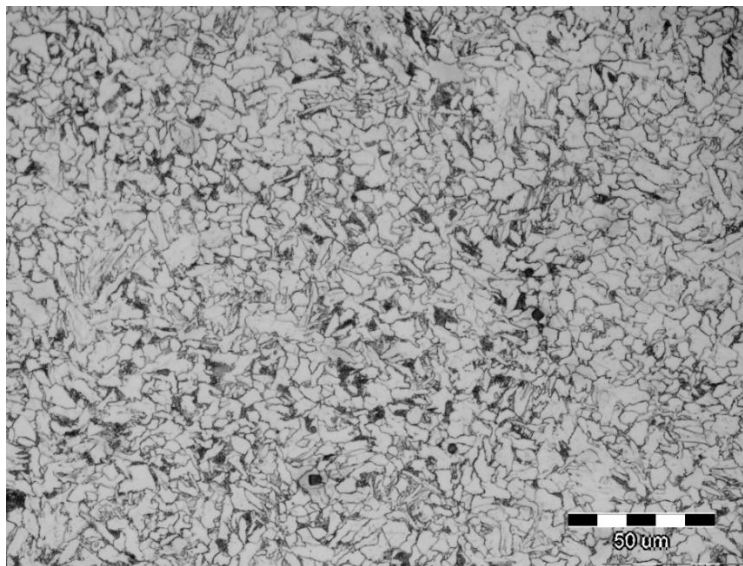


Slika 73. Mikrostruktura niskougličnog čelika na mjestu najdaljem mjestu loma, u smjeru valjanja, nakon statičkog vlačnog ispitivanja

Slika 74. prikazuje mikrostrukturu niskougličnog čelika pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja, a slika 75. prikazuje mikrostrukturu niskougličnog čelika okomito na smjer valjanja, nakon provedenog statičkog vlačnog pokusa, na mjestu najdaljem od mjesta loma uzorka.



Slika 74. Mikrostruktura niskougličnog čelika na mjestu najdaljem mjestu loma, pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja, nakon statičkog vlačnog ispitivanja



Slika 75. Mikrostruktura niskougličnog čelika na mjestu najdaljem mjestu loma, okomito na smjer valjanja, nakon statičkog vlačnog ispitivanja

Usporedbom dobivenih rezultata provedene metalografske analize zapažaju se promjene u mikrostrukturi. Međutim one nisu očekivano velike na mjestu loma u usporedbi s početnom mikrostrukturuom. Također nije vidljiva značajnija anizotropija u strukturi, posebno izduženje kristalnog zrna, tijekom hladne deformacije. Obzirom da je anizotropija kao svojstvo toplo valjanih traka i limova još nedovoljno istraženo, ova ispitivanja nameću potrebu daljnjih istraživanja ovih uzoraka.

## 5. ZAKLJUČAK

Ispitivanja su provedena na niskougličnom čeliku. Ispitivanje anizotropnog ponašanja niskougličnog čelika tijekom hladne deformacije provedeno je istovremenim statičkim vlačnim pokusom, optičkom digitalnom kamerom uz metodu digitalne korelacije slike, termografskom kamerom uz metodu termografije, te metalografskim ispitivanjem.

Istraživana je anizotropija toplovaljane trake i utjecaj stupnja deformacije na anizotropno ponašanje toplovaljane trake tijekom hladne deformacije.

Analizom rezultata mjerenja statičkim vlačnim pokusom, metodom termografije metodom DIC-a u karakterističnim točkama  $R_p$ ,  $R_m$  i kod loma uzorka, utvrđena je zadovoljavajuća homogenost toplo valjane trake.

Numeričkom analizom rezultata mjerenja određeni su faktori anizotropije u toplovaljanoj traci. Očekivano, faktor vertikalne anizotropije razlikuje se ovisno o smjeru uzimanja uzoraka u odnosu na smjer valjanja. Faktor srednje anizotropije je niži od dozvoljenog ( $r_s \text{ max} = 6$ ) za duboko izvlačenje lima. To znači da ispitivana toplo valjana traka ima zadovoljavajuću anizotropiju. Faktor ravninske anizotropije  $\Delta r$  je manji od dozvoljenog ( $\Delta r = 1$ ) za duboko izvlačenje također je potvrdio da traka ima zadovoljavajuću homogenost prema kriterijima za duboko izvlačenje.

Istraživanje utjecaja stupnja deformacije na anizotropno ponašanje toplo valjane trake pokazalo je da se pri ukupnoj deformaciji većoj od 30% u odnosu na ukupnu deformaciju primjećuje određena anizotropija, što je najviše izraženo pri ispitivanju uzoraka pod kutom  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja trake.

Provedena istraživanja su pokazala da su metode termografije i digitalne korelacije vrlo povoljne za istraživanje anizotropije, naročito tijekom plastične deformacije.

Obzirom na činjenicu da je anizotropno ponašanje toplo valjane trake nedovoljno istraženo, posebno kod novih tehnologija kao što su hidrooblikovanje, oblikovanje ultrazvukom i inkrementalno oblikovanje, daljnja istraživanja kako na čelicima tako i na drugim metalnim materijalima svakako su potrebna.

## 6. LITERATURA

- [1] S. Rešković, Osnove teorije oblikovanja deformiranjem, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2020.
- [2] S. Rešković, A. Preloščan, Vj. Novosel-Radović, Ž. Fried, Primjena čelika mikrolegiranog niobijem u proizvodnji tankostijenih šavnih cijevi za skele, Metalurgija 33 (1994) 2, 79-83.
- [3] M. Novosel, D. Krumes, Posebni čelici, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, Slavonski Brod, 1998.
- [4] S. Jindal, R. Chibber, N. P. Mehta, Issues in welding of HSLA steel, Advanced Materials Research Vol. 365 (2012), 44-49.
- [5] B.K. Panigrahi. Processing of low carbon steel plate and hot strip—an overview. Bulletin of Material Science, Vol. 24, No. 4, August 2001, pp. 361–371
- [6] [https://sg.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/9827/6/06\\_chapter%201.pdf](https://sg.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/9827/6/06_chapter%201.pdf) (22.04.2020)
- [7] <http://www.steel-insdag.org/InFocusDocs/ROLLING%20-%20A%20Recollection.pdf> (23.05.2020)
- [8] <https://www.primetals.com/portfolio/hot-rolling-flat/hot-strip-mill> (23.04.2020)
- [9] <https://uawildoleft.ru/ku%C4%87a/13452-opseg-i-prednosti-vru%C4%87e-valjanog-lima.html> (23.04.2020)
- [10] I. Jandrlić, Raspodjela naprezanja u zoni deformacije niobijem mikrolegiranog čelika, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2015.
- [11] S. Rešković, Teorija oblikovanja deformiranjem, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2014.
- [12] H. Yada, Prediction of microstructural changes and mechanical properties in hot strip rolling, Nippon steel corporation, 105-119, 1988, Japan
- [13] D. Devakumar, D.B. Jabaraj, V.K. Bupesh Raja, Literature review on the effect of processing on the mechanical and metallurgical properties of low carbon steels, ARPN Journal of engineering and applied sciences, 10, 2015
- [14] P. Korczak, Influence of controlled rolling condition on microstructure and mechanical properties of low carbon micro – alloyed steels, Journal of materials processing technology 157-158 (2004) 553 – 556.
- [15] D. A. Skobir, High strength low alloy HSLA steels, Materials and technology 45 (2011) 4, 295-301.
- [16] [https://www.leonghuat.com/articles/elements.htm?fbclid=IwAR007dzQN1yKeMbc-5Uxsn3MCIHktW9\\_V7vVSGQclbN5I2dO598fN00j--M](https://www.leonghuat.com/articles/elements.htm?fbclid=IwAR007dzQN1yKeMbc-5Uxsn3MCIHktW9_V7vVSGQclbN5I2dO598fN00j--M) (24.04.2020)
- [17] <https://www.ispatguru.com/manganese-in-steels/?fbclid=IwAR2M7eecuS5mwTdMMkCAHq7lyslKxDFJfJLqiKRHCJJfa32Wy4AJZXWMUXw> (24.04.2020)



- [18] <https://www.industrialheating.com/gdpr-policy?url=https%3A%2F%2Fwww.industrialheating.com%2Farticles%2F89322-the-influence-of-manganese-in-steel> (24.04.2020)
- [19] S. Rešković, M. Narandić, D. Kukuruzović, Mogućnost usvajanja proizvodnje toplovaljanje trake mikrolegirane niobijem u Željezari Sisak, *Metalurgija* 30 (1991) 4, 155-160.
- [20] F. Skender, Utjecaj mikrostrukture i brzine deformacije na početak plastičnog hladne deformacije čelika mikrolegiranog niobijem, *Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2018.*
- [21] S. Rešković, I. Jandrić, F. Vodopivec, Influence of testing rate on Luders band propagation in niobium microalloyed steel, *Metalurgija* 55 (2016) 2, 157-160.
- [22] N. J. Kim, The Physical Metallurgy of HSLA Linepipe Steels, *Journal of Metals*, April 1983.
- [23] A. J. DeArdo, *Microalloyed Steels: Past, Present and Future*, The Chinese Society for Metals, TMS 2016.
- [24] Lj. Slokar Benić, S. Rešković, M. Marciuš, T. Brlić, Change of microstructure of Nb microalloyed steel at start of the plastic flow during cold deformation, *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 7 (2019), 120 – 122.
- [25] Yu, H., Kang, Y. Morphology and precipitation kinetic of AlN in hot strip of low carbon steel produced by compact strip production, *Materials Science and Engineering A*, 2003, Vol 351, 265-27
- [26] S. Pitakkoraras, C. Hirunlabh, T. Umeda, Microstructure observation and mechanical properties of hot rolled low carbon steel strip with boron addition, *Proceedings of METAL 2011, Brno, Czech Republic, 18–20 May 2011.*
- [27] H. Yu, Y. Kang, Effect of boron on hot strips of low carbon steel produced by compact strip production, *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 15 (2008), 138.
- [28] R. Makusti, Anisotropy of the mechanical properties of hot rolled steel coils for welded pipes, *International Scientific Journal: Machines, Technologies, Materials*, 11 (2017), 549-552
- [29] Wenk H. R. Houte P. V., Texture and anisotropy, *Rep. Prog. Phys.* 67, 2004, pp.1367-1428.
- [30] B. Hutchinson, *Critical Assessment 16: Anisotropy in metals*, Materials Science and Technology, 2015
- [31] [https://bib.irb.hr/datoteka/665498.MATERIJALI\\_1\\_skripta\\_listopad\\_2013.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/665498.MATERIJALI_1_skripta_listopad_2013.pdf) (28.07.2020)
- [32] Devakumar D., Jabaraj D. B., Bupesh V. K., Literature review on the effect of processing on the mechanical and metallurgical properties of low carbon steels, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 10, No. 11, June 2015, 5012-5016.

- [33] A. Ahmed, J. Al-Sabea, N. Yousif, Effect of annealing treatment on the anisotropy behavior of cold rolled stainless steel 304 sheet, *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 11 (2018) 2, 84-89
- [34] M. Kršulja, D. Bognolo, Određivanje alatne geometrije u ovisnosti o ponašanju materijala tijekom procesa obrade deformiranjem, *Zbornik Veleučilišta u Rijeci*, 2 (2014), 255 – 274
- [35] M. Kršulja, Unapređenje procesa inkremetalnog preoblikovanja u jednoj točki, *Doktorska disertacija*, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka, 2013.
- [36] S. Rešković, *Tehnologije oblikovanja deformiranjem*, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2017.
- [37] [http://www.kalinic.info/strucni/ihu\\_ahu.pdf](http://www.kalinic.info/strucni/ihu_ahu.pdf) (28.11.2019)
- [38] M. Jurković, I. Mamuzić, E. Karabegović, The sheet metal forming with hydraulic fluid pressure, *Metalurgija* 43., 2004.
- [39] I. Jandrić, S. Rešković, T. Brlić, Distribution of stress in deformation zone of niobium microalloyed steel, *Metals and materials international*, 39 (2018), 746 – 751
- [40] S. Rešković, T. Brlić, F. Skender, Application the method digital image correlation for measurement of small deformation at the beginning of plastic flow of materials, *New technologies, development, and application*, 3 (2020), 299 – 304
- [41] I. Jandrić, S. Rešković, Choosing the optimal coating for thermographic inspection, *The Holistic Approach to Environment*, 5 (2015), 127 – 134
- [42] T. Brlić, S. Rešković, I. Jandrić, F. Skender, Influence of strain rate on stress changes during Lüders bands formation and propagation, *IOP conference series, Materials science and engineering*, 461, 2018.
- [43] S. Rešković, I. Jandrić, T. Brlić, F. Vodopivec, Effects of preferred grain orientation on the Lüders bands appearance, *Metalurgija*, 59 (2020), page 59 – 62
- [44] A. Povrzanović, *Obrada metala deformiranjem, odabrana poglavlja*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 1996.

## 7. ŽIVOTOPIS

### OSOBNI PODACI:

Ime i prezime: Filip Skender  
Datum i mjesto rođenja: 25.06.1996, Sisak  
Adresa: Ivana Cankara 6, 44000 Sisak  
Telefon: 098 954 9915  
Email: filip.skender1@gmail.com

### OBRAZOVANJE

2015 - Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet  
2011-2015 Športska gimnazija, Zagreb

### RADNO ISKUSTVO

2017 - Globalna hrana d.o.o. – Radnik

### VJEŠTINE

Rad na računalu: Vrlo dobro poznavanje operacijskog sustava Windows, rad u programskom paketu MS Office, Autocad, i osnove programiranja u C++

Strani jezik: Engleski

### ZNANSTVENO ISTRAŽIVAČKE AKTIVNOSTI

HRZZ IP-2016-06-1270 „Istraživanja početka plastičnog toka metala kod hladne deformacije“- član projektnog tima

### KONFERENCIJE

T Brlić, S Rešković, I Jandrić, F Skender, Influence of strain rate on stress changes during Lüders bands formation and propagation, 5th International Conference on Recent Trends in Structural Materials, November 14th-16th 2018, Pilsen, Czech Republic, Oral presenter

F Skender, T Brlić, S Rešković ,Influence of stretching rate on the beginning of cold deformation in niobium microalloyed steel, 18th International foundrymen conference, Sisak, May 15th – 17th, 2019, Oral presenter

T Brlic, F Skender, S Rešković, I Jandrić, Što kažu boje kako materijali podnose sile, Festival znanosti 2019, Oral presenter

#### PREZENTACIJE

Znanstveni rad - „Primjena suvremenih metoda za istraživanje početka plastičnog toka čelika kod hladne deformacije’ - Tehnologijada 2019

#### IZDANJA

T Brlić, S Rešković, I Jandrić, F Skender, Influence of strain rate on stress changes during Lüders bands formation and propagation, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 461 (2019)

S. Rešković, T. Brlić, F. Skender, Application the method digital image correlation for measurment of small deformation at the beggining of plastic flow of materials, New technologies, development, and application III, 2020, page 299 – 304

#### ČLANSTVA

Predsjednik Studentskog zbora Metalurškog fakulteta

Član Studentskoga zbora Sveučilišta u Zagrebu,

Član vijeća Studentskog centra u Sisku

Zamjenik člana Vijeća tehničkog područja

Član radne skupine za promidžbu Metalurškog fakulteta

#### PRIZNANJA I NAGRADE

Dobitnik STEM stipendije,

Dobitnik posebne dekanova nagrade na Metalurškom fakultetu 2018/2019

#### SUDJELOVANJA

Sudjelovanje u popularizaciji znanosti Metalurškog fakulteta - 2. Dan karijera Metalurškog fakulteta, predstavljanje Metalurškog fakulteta u srednjim školama