

# Utjecaj plastičnosti materijala

---

**Petrinčić, Antonio**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:176941>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet u Puli



**Antonio Petrinčić**

# **UTJECAJ PLASTIČNOSTI MATERIJALA**

Završni rad

Pula, rujan 2023.

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet u Puli



**Antonio Petrinčić**

## **UTJECAJ PLASTIČNOSTI MATERIJALA**

Završni rad

**JMB: 0303073861, izvanredni student**

**Studijski smjer: Proizvodno strojarstvo**

**Predmet: Materijali II.**

**Znanstveno područje: Tehničke znanosti**

**Znanstveno polje: Strojarstvo**

**Znanstvena grana: Proizvodno strojarstvo**

**Mentor: doc.dr.sc. Vedrana Špada**

**Komentor: doc.dr.sc. Marko Kršulja**

Pula, rujan 2023.

## ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici, doc.dr.sc. Vedrani Špadi na pomoći i strpljenju tijekom pisanja ovog rada. Zahvalio bih se i komentoru doc.dr.sc Marku Kršulji na pruženoj pomoći i savjetima koji su mi znatno olakšali pisanje ovog rada. Zahvaljujem se svojoj obitelji na podršci. Posebno bih se zahvalio svojoj djevojci koja je najzaslužnija za moj upis na fakultet, koja je vjerovala u mene i u konačnici mi bila najveća pomoć i podrška tijekom studiranja.



Tehnički fakultet u Puli

doc. dr. sc. Vedrana Špada  
(Ime i prezime nastavnika)

Materijali 2  
(Predmet)

**Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**  
**TEHNIČKI FAKULTET U PULI**  
**ZADATAK TEME ZAVRŠNOG RADA**

**Pristupniku** Antoniu Petrinčiću

**MBS:** 0303073861

**Studentu stručnog studija Tehničkog fakulteta u Puli izdaje se zadatak za završni rad – tema završnog rada pod nazivom:**

**Utjecaj plastičnosti materijala**

**Sadržaj zadatka: Postavljanje hipoteze, problema i ciljeva te metode samog istraživanja. Opis metodologije ispitivanja i analiza dobivenih rezultata. Naposljetku izračun koeficijenta anizotropije i krivulje tečenja te zaključak s osvrtom autora na dobivene rezultate.**

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o završnom radu Sveučilišta u Puli.

**Izvanredni, Proizvodno strojarstvo**

**Datum:** 1. travnja 2023.

**Potpis nastavnika** \_\_\_\_\_

**Potpis nastavnika** \_\_\_\_\_



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani \_\_\_\_\_, kandidat za prvostupnika \_\_\_\_\_ ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljeni način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student

U Puli, \_\_\_\_\_



## IZJAVA O KORIŠTENJU AUTORSKOG DJELA

Ja, \_\_\_\_\_ dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj Završni rad pod nazivom

\_\_\_\_\_

koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, \_\_\_\_\_

Potpis

\_\_\_\_\_

## Sadržaj

1. UVOD.....	1
1.1. Hipoteza .....	1
1.2. Predmet istraživanja .....	1
1.3. Problem istraživanja .....	1
1.4. Ciljevi istraživanja .....	2
1.5. Metode istraživanja.....	2
1.6. Struktura rada.....	2
2. OBRADA MATERIJALA BEZ ODVAJANJA ČESTICA.....	3
2.1. Kovanje .....	4
2.2. Izvlačenje .....	5
2.3. Valjanje.....	5
3. ISPITIVANJE UTJECAJA VALJANJA NA SVOJSTVA MATERIJALA .....	7
3.1. Anizotropna svojstva materijala .....	7
3.2. Materijal i metode ispitivanja .....	8
3.2.1. Ispitivanje kemijskog sastava.....	9
3.2.2. Metalografska analiza mikrostrukture materijala .....	12
3.2.3 Ispitivanje čvrstoće – vlačni test.....	14
4 PROVEDBA ISPITIVANJA UTJECAJA PLASTIČNOSTI MATERIJALA .....	17
5. ANALIZA REZULTATA.....	19
6. IZRAČUN KOEFICIJENTA ANIZOTROPIJE I KRIVULJE TEČENJA.....	24
7. ZAKLJUČAK.....	31
POPIS SLIKA .....	32
POPIS TABLICA.....	33
LITERATURA .....	34
SAŽETAK .....	35
SUMMARY .....	35



## 1. UVOD

### 1.1. Hipoteza

U ovome istraživanju ispitati će se plastičnost metala te ponašanje materijala DC01 kada se prijeđe granica tečenja pod djelovanjem vanjske sile a prije izrade proizvoda. Pri tome osnovni zadatak je ispitati anizotropna svojstva materijala, u ovom slučaju čelika, odnosno utvrditi utjecaj smjera valjanja na vlačnu čvrstoću.

### 1.2. Predmet istraživanja

Osnovni predmet istraživanja je plastičnost materijala te istraživanje plastične deformacije nakon prestanka djelovanja sile te trenutka u kojemu dolazi do loma. Pri tome je interesantno polje plastičnosti u kojemu materijal trajno zadržava oblik nakon prestanka djelovanja sile, dakle plastična deformacija. U tom pogledu važna je anizotropnost, to je svojstvo materijala da posjeduje različitu duktilnost u različitim smjerovima. Anizotropija je posljedica valjanja limova prilikom proizvodnje na valjačkim stanovima koji utiskuju smjer kristalnim zrnima. Vlačna čvrstoća je mehaničko svojstvo materijala, oznaka za maksimalno naprezanje koje se može postići pri opterećenju na vlak. Duktilnost je sposobnost materijala da se mehanizmima plastične deformacije opire djelovanju naprezanja i na taj način povećava otpornost na krhki lom.

### 1.3. Problem istraživanja

Osnovni problem je da za odabrani čelik DC01 (1.0330) vlačna čvrstoća ( $R_m$ ) može varirati od 2710 do 410 MPa. Pri tome mehanička svojstva ovise o načinu proizvodnje i od proizvođača a krivi odabir može utjecati na lom i kvarove pri obradi metala. Problem istraživanja je da metali ovise o postupku proizvodnje te da pri primjeni u industriji dolazi do promjene od predviđenog ponašanja. Kvaliteta proizvoda ovisi o toleranciji dosjeda koji se odabere pri spajanju različitih strojnih elemenata. U ovome istraživanju namjena je proizvodnja metalnih proizvoda poput čašica, lonaca, ladica,

ormara, kutija i slično a tolerancija dosjeda su vrlo uske. Anizotropija je osnovni problem koji se manifestira različitim greškama poput nabora, ušičavosti i slično a to utječe na sposobnost spajanja i samog oblikovanja proizvoda.

#### **1.4. Ciljevi istraživanja**

- Tumačiti sposobnost oblikovanja materijala bez razaranja.
- Ispitati utjecaj valjanja na svojstva materijala.
- Eksperimentalno ispitati materijal.
- Tumačiti plastičnost materijala.

#### **1.5. Metode istraživanja**

Metoda promatranja koristit će se kako bi se u potpunosti dokumentirala mehanička i kemijska svojstva materijala te prikazale tablice s eksperimentalnim rezultatima.

Eksperimentalna metoda koristiti će se kako bi se postavila provedba testiranja odabranog materijala i uzoraka koji su definirani kao ključni u odabranom istraživanju.

#### **1.6. Struktura rada**

U uvodu je postavljena hipoteza, predmet i problem istraživanja te su dani ciljevi rada i metodologija rada.

U drugom poglavlju ovog rada opisani su postupci obrade materijala bez odvajanja čestica s naglaskom na valjanje. Materijal korišten za ispitivanje anizotropnosti u ovom radu je hladno valjani čelični lim debljine 2 mm.

U trećem poglavlju opisan je utjecaj valjanja na svojstva materijala. Spomenuta su vrlo važna anizotropna svojstva materijala te je kasnije opisan korišteni materijal i metode ispitivanja svojstava materijala. Kemijski sastav je ispitan optičkom emisijskom spektrometrijom, mikrostruktura je ispitana metalografskim mikroskopom, a tvrdoća je ispitana prema Vickersu.

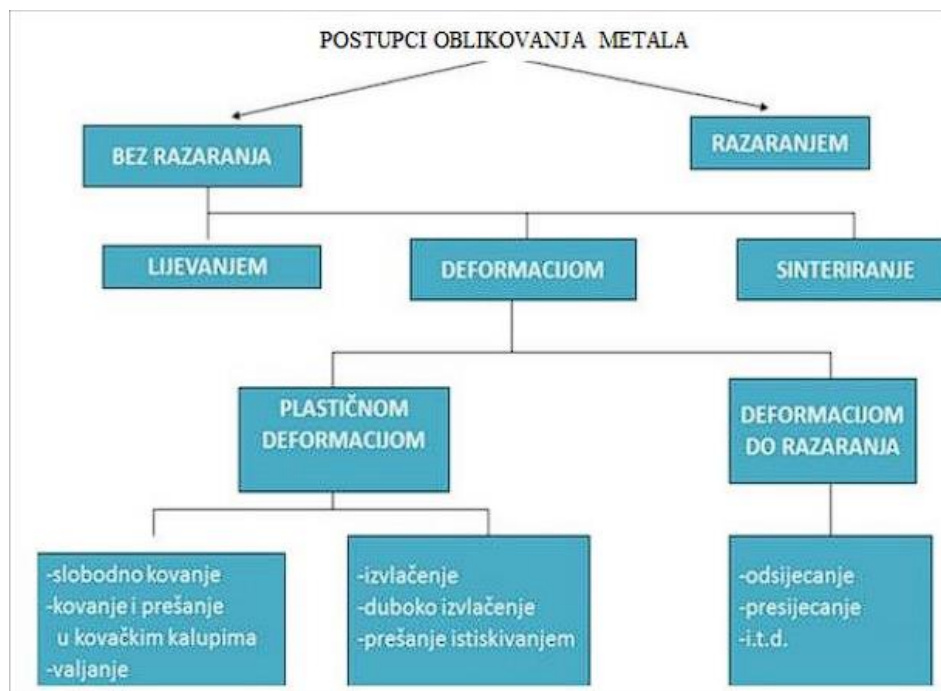
Po izvršenoj kontroli kvalitete materijala odrađen je vlačni test u svrhu ispitivanja utjecaja plastičnosti, odnosno smjera deformacije materijala na buduća primjenska svojstva. Rezultati ispitivanja prikazani su u četvrtom poglavlju.

Na kraju rada, dan je zaključak na dobivene rezultate ispitivanja.

## 2. OBRADA MATERIJALA BEZ ODVAJANJA ČESTICA

Većina nerazornih proizvodnih tehnologija zasniva se na procesima deformacije kojima se oblikuju metalne legure, kompoziti i polimeri. Pojedine tehnike se koriste kako bi se u svrhu izrade konačnog proizvoda optimizirala njihova mikrostruktura te kemijska i mehanička svojstva (slika 1).

Slika 1: Pregled postupaka oblikovanja metala



Izvor: S. Rešković: Teorija oblikovanja deformiranjem [1]

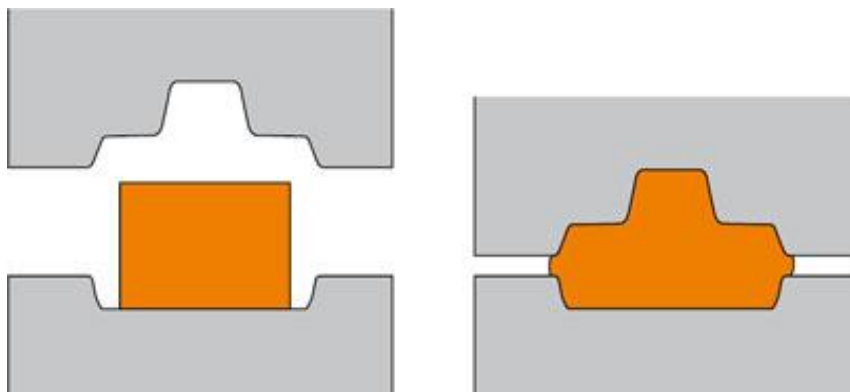
Neki od postupaka obrade odvajanjem čestica su bušenje, brušenje, glodanje, tokaranje i slično.

Kod postupaka obrade bez odvajanja čestica, materijal mijenja samo svoj oblik bez gubitka mehaničkih i kemijskih svojstava. Neki postupci obrade bez odvajanja čestica su kovanje, izvlačenje i valjanje. [2]

## 2.1. Kovanje

Jedan od najstarijih postupaka oblikovanja materijala deformiranjem, odnosno bez odvajanja čestica je kovanje. Kovanje je postupak koji se izvodi ručno ili pomoću stroja. Tradicionalno ručno kovanje podrazumijeva udaranje metalnog predmeta čekićem na nakovnju dok se kod strojnog kovanja metalni predmet oblikuje udarcima bata. Postupak deformiranja metala kovanjem može se izvoditi u zagrijanom, poluzagrijanom i hladnom stanju. Strojno kovanje, osim batom, može se izvoditi i kovanjem u ukovnju. Ovim postupkom izradak se deformira u toplom stanju na način da se udarcima čekića ili pod utjecajem preše utiskuje u kovački kalup. Dobiveni proizvod naziva se otkivak. [2] Kovanje u ukovnju prikazano je na slici 2.

Slika 2: Kovanje u ukovnju



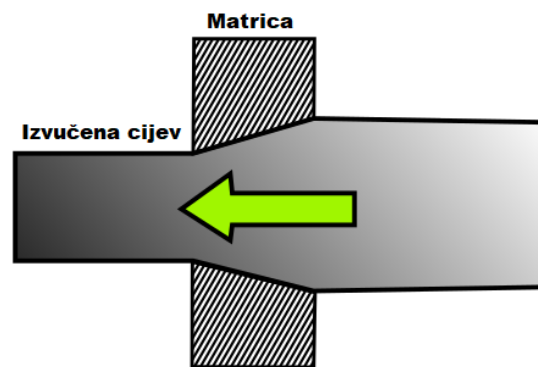
Izvor:

[https://www.schulergroup.com/major/us/technologien/produkte/grundlagen\\_massivu\\_mformung\\_gesenkschmieden/index.html](https://www.schulergroup.com/major/us/technologien/produkte/grundlagen_massivu_mformung_gesenkschmieden/index.html) [3]

## 2.2. Izvlačenje

Izvlačenje je također jedan od postupaka obrade metala bez odvajanja čestica. Koristi se u proizvodnji cijevi, žica, šipki i traka. Izvodi se u hladnom stanju, a koristi se za promjenu promjera i debljine stijenke, te promjenu oblika. Pri izvlačenju potrebno je pripaziti na silu izvlačenja, oblik i brzinu izvlačenja.[1] Postupak izvlačenja je shematski prikazan na slici 3.

Slika 3: Izvlačenje



Izvor: <https://capitalsteel.net/blog/cold-drawn-steel-common-questions> [4]

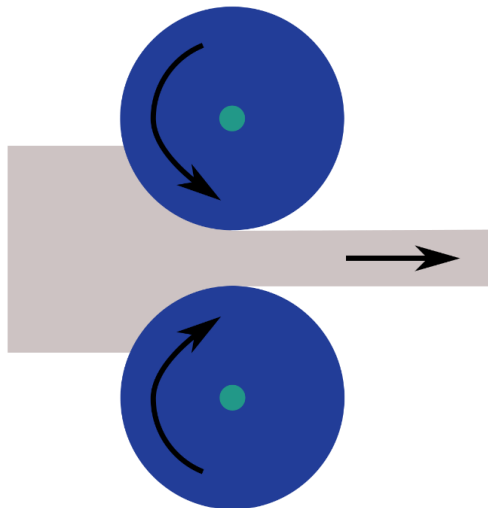
## 2.3. Valjanje

Jedan od najčešćih postupaka oblikovanja deformiranjem je valjanje. Obradak se valja između dva valjka koji se okreću u suprotnom smjeru čime se smanjuje poprečni presjek te povećava duljina što i prikazuje slika 4. Produkti valjanja mogu biti poluproizvodi koji se valjaju u zagrijanom stanju i gotovi proizvodi valjani u zagrijanom i hladnom stanju. [1]

Komadi su uglavnom velike dužine, a valjaju se najčešće plosnati ili okrugli profili. Valjanje je moguće podijeliti na uzdužno, poprečno i koso valjanje. Pri uzdužnom valjanju materijal se nalazi između dva valjka koji se okreću u suprotnom smjeru u odnosu na smjer kretanja metala. Za razliku od uzdužnog, kod poprečnog valjanja se valjci okreću u istom smjeru u kojem je postavljen valjani materijal pri čemu se on učvršćuje posebnim uređajima. Naposljetku koso valjanje karakteriziraju kose plohe

valjka koje su okrenute za neki kut u odnosu na valjani materijal što dovodi do njegovog postupnog rotiranja oko osi.

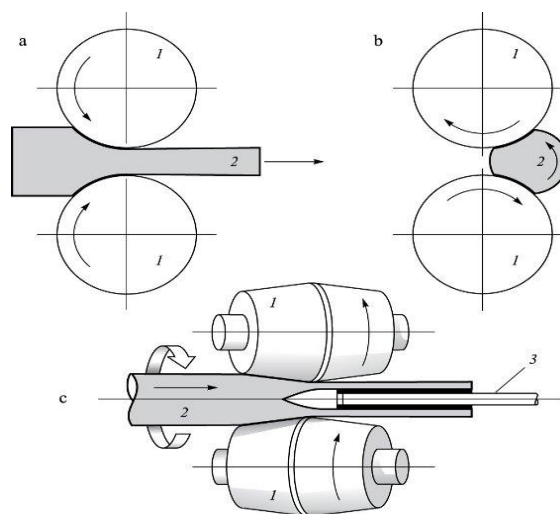
Slika 4: Valjanje



Izvor: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Valjanje> [5]

Na slici 5 je shematski prikazan proces valjanja gdje se komad materijala nalazi između dva valjka koji se okreću u suprotnom smjeru. Na slici 6 prikazane su vrste valjanja prema smjeru, gdje su brojem 1 označeni valjci, brojem 2 uložak i brojem 3 trn koji služi za oblikovanje deblostijene cijevi. [6]

Slika 5: Vrste valjanja



Izvor: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=63798> [6]

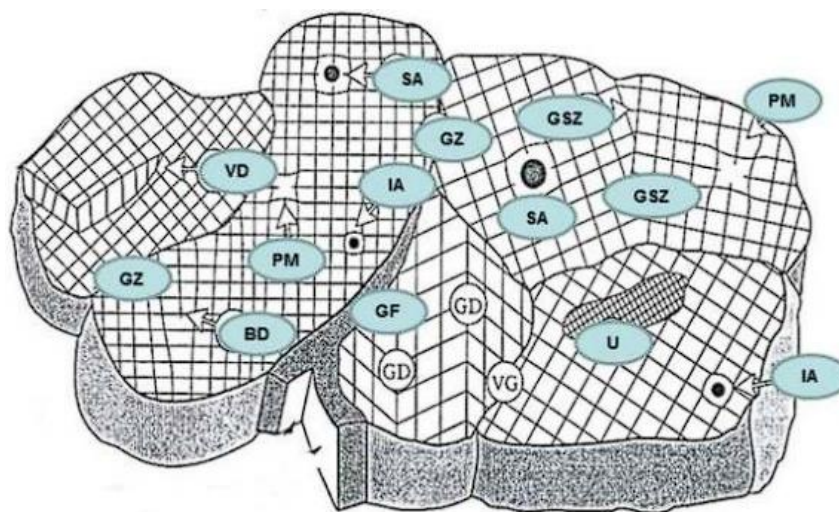
### 3. ISPITIVANJE UTJECAJA VALJANJA NA SVOJSTVA MATERIJALA

Pojam plastičnosti materijala odnosi se na nepovratnu promjenu oblika kao i dimenzija nekog predmeta. Pojam suprotan plastičnosti je elastičnost kod koje se materijal još može vratiti u prvobitno stanje nakon djelovanja sile. Plastičnost materijala može imati utjecaj na karakteristike i svojstva materijala koja se onda ispituju različitim metodama. [7]

#### 3.1. Anizotropna svojstva materijala

Pojam anizotropija dolazi iz grčkih riječi *aniso* (promjena) i *tropos* (smjer), odnosno različita svojstva u različitim smjerovima. Materijal čija fizikalna svojstva ovise o njegovoj orijentaciji naziva se anizotropnim materijalom. Pojava anizotropije u čeliku moguća je kao posljedica zaostalih nečistoća pri proizvodnji, a najčešće je uzrokovana postupcima proizvodnje ili tehnologijama obrade materijala u proizvod ili poluproizvod, primjerice lim. Na pojavu anizotropnosti utječu greške prisutne u kristalnoj rešetci koje mogu biti točkaste, površinske i volumne. Vrste grešaka, odnosno dislokacija u kristalnoj rešetci prikazane su na slici 6. [8, 7]

Slika 6: Greške u kristalnoj rešetci



Izvor: Rešković, S.: Teorija oblikovanja deformiranjem [7]

Prema slici 6 točkaste greške prikazane su kao prazna mjesta (PM), intersticijski (IA) i supstitucijski atomi (SA) čine nuldimenzijske nesavršenosti. Jednodimenzijske linijske nesavršenosti mogu biti vijčane (VD) i stepenaste (BD). Površinske ili dvodimenzijske greške čine granice zrna (GZ), subzrna (GS) te granice faza. Volumne ili trodimenzijske greške su prazna mjesta, odnosno mikro i makro šupljine (PM) te uključci (U). [7]

Izotropija je suprotna pojava anizotropiji gdje materijal pokazuje jednaka svojstva u svim smjerovima. [8]

U ovom radu zadatak je odrediti utjecaj smjera valjanja te istražiti anizotropnost čeličnog hladnovaljanog lima debljine 2 mm od materijala DC01, odnosno ispitati utjecaj plastičnosti materijala na vlačnu čvrstoću.

### 3.2. Materijal i metode ispitivanja

Ispitivani materijal je čelični hladnovaljani lim oznake DC01 prema normi EN 10130-2006. Kemijski sastav materijala DC01 prema zahtjevima norme dan je u tablici 1.

Tablica 1: Kemijski sastav čelika DC01 prema EN 10130-2006

C %	Mn %	P %	S %
max. 0,12	max. 0,6	max. 0,045	max. 0,045

Izvor: [http://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=199](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=199), [9]

Čelik DC01 ima široku primjenu, zbog niskog postotka ugljika njegova manipulacija je jednostavna, lako se savija i ima dobra mehanička svojstva, vari se i lemi bez ikakvih poteškoća. Također je i duktilan, što znači da se lako oblikuje u razne oblike. Često se koristi u automobilske industriji i za proizvodnju elektroničkih komponenti. Nije toliko čvrst, za razliku od nekih drugih vrsta čelika, pa se iz tog razloga ne koristi za slučajeve gdje je potrebna velika čvrstoća materijala. [10]



### 3.2.1. Ispitivanje kemijskog sastava

Kemijski sastav uzorka ispitan je optičkim emisijskim spektrometrom GDS500A tvrtke LECO u svrhu kontrole kvalitete materijala i ispitivanja sukladnosti kemijskog sastava s certifikatom. Optički emisijski spektrometar je uređaj koji primjenjuje metodu fotoelektrične pretvorbe za analizu više elemenata. Ima vrlo široku primjenu, koristi se za analizu materijala u mnogim industrijama kao što su metalurgija, čelik, sustav inspekcije kvalitete i slično. Pri završetku spektroskopije, spektar se slaže po valnim duljinama. Spektralne linije elemenata prolaze kroz izlazni prorez te se ubrizgavaju u fotomultiplikatorsku cijev (PMT) ili senzor slike CCD, gdje optički postaje električni signal. Električni signal pretvara se u modul pomoću kontrolnog mjernog sustava, računalo ga obrađuje te ispisuje kao postotak svakog od elemenata. [11] Na slici 7 prikazan je optički emisijski spektrometar na kojem je u Centru za istraživanje METRIS Istarskog veleučilišta odrađeno ispitivanje kemijskog sastava materijala.

Slika 7: Optički emisijski spektrometar GDS500A LECO



Izvor: Autor

Provedena su tri mjerena te je dobiven kemijski sastav lima. Rezultat ispitivanja je kao medijan prikazan u tablici 2. Usporedno s tablicom 1 postoci udjela ugljika, mangana, fosfora i sumpora su unutar dozvoljenih granica.

Tablica 2: Kemijski sastav ispitivanog uzorka materijala DC01

Name	C %	Mn %	Si %	P %	S %	Mo %	Ni %	Cr3 %
P1-0-1	0,052	0,298	0,0124	0,0086	0,0052	0,0024	0,0202	0,028
V %	W %	Cu %	Al %	Ti %	Co3 %	Nb %	Pb %	Sn3 %
0	0,013	0,0479	0,0547	0	0,0009	0,0011	0	0,026
As %	Sb %	Zr %	B %	Voltage	Current	Pressure	Analysis Date	Fe%
0	0	0,0006	0	1002	35	4	18.4.2023 11:00	99,41

Izvor: Autor

U svrhu detaljne analize ulaznog materijala odrađena su i ispitivanja tvrdoće prema Vickersu i metalografska analiza.

Tvrdoća je sposobnost materijala da odolijeva prodiranju drugog, znatno tvrdog materijala. Tvrdoća se ispituje kako bi se utvrdila svojstva materijala i kako bi provjerili odgovara li materijal zahtijevanim parametrima. Najčešće korištene metode za ispitivanje tvrdoće su prema Rocwellu, Brinellu i Vickersu. [12]

Tvrdoća po Vickersu označava se kao HV (eng. *Hardness Vickers*), nakon čega se piše vrijednost ispitne sile te vrijeme ispitivanja. Mjerenje tvrdoće ovom metodom pogodno je za ispitivanje malih dijelova koji se površinski obrađuju, a ispitivanja se vrše malim opterećenjima. Prednost korištenja Vickersove metode je širina mjerne skale koja je vrlo pogodna za ispitivanja u laboratorijskom okruženju, metoda je univerzalna te je moguće mjerenje vrlo tankih i vrlo tvrdih materijala. Međutim, moguće su pogreške u mjerenju radi korištenja mikroskopa ili projektoru koji nisu precizni kao moderni računalni sustavi. Ispitivanu površinu prije mjerenja treba pripremiti kako bi rezultati mjerenja bili vjerodostojni. [12]

U ovom radu korištena je metoda ispitivanja tvrdoće prema Vickersu. Tvrdoća je ispitana tvrdomjerom DURAMIN 2 tvrtke STRUERS (slika 8).

Slika 8: Tvrdomjer DURAMIN 2



Izvor: Autor

Izvedeno je pet mjerenja te dobivena srednja vrijednost tvrdoće, rezultati mjerenja prikazani su u tablici 3. Srednja vrijednost u iznosu od 106,4 HV zadovoljava minimalnu tvrdoću koja prema EN 10130-2006 iznosi 105 HV.

Tablica 3: Rezultati ispitivanja tvrdoće po Vickersu uzorka materijala DC01

Broj mjer.	Uzorak
	<b>P1 - 0 -1</b>
<b>1</b>	106
<b>2</b>	108
<b>3</b>	106
<b>4</b>	106
<b>5</b>	106
<b>srednja vrijednost</b>	<b>106,4</b>

Izvor: Autor

### 3.2.2. Metalografska analiza mikrostrukture materijala

Metalografija je grana znanosti o metalima koja se bavi istraživanjem mikrostrukture metala i slitina. Metalografska analiza može se izvesti makroskopskim i mikroskopskim pregledom. Makroskopski pregled odvija se pri povećanju do 20 puta, otkrivaju se nepravilnosti u strukturi poput šupljina, pukotina, pogreški pri valjanju i slično. Mikroskopski pregled odvija se pri povećanju do 2000 puta, otkriva raspored, veličinu i oblik zrna u mikrostrukтури koja ovisi o kemijskom sastavu, uvjetima skrućivanja i obradi materijala (toploj i hladnoj). [12]

Priprema površine ispitnog uzorka započinje brušenjem zatim umetanjem uzorka u dvokomponentnu poliestersku smolu. Uređaj proizvođača STUERS LABOPOL služi prvo za brušenje pa za poliranje površine uzorka. Slijedi odmaščivanje, ispiranje i sušenje površine uzorka što predstavlja pripremu za postupak kemijskog nagrivanja. Kemijsko nagrivanje rađeno je 3-postotnom otopinom nitala u trajanju od 60 sekundi. Naposljetku metalografska analiza napravljena je BX51 metalografskom mikroskopu tvrtke OLYMPUS. Uređaj za precizno brušenje i poliranje STRUERS LABOPOL prikazan je na slici 9, a metalografski mikroskop Olympus BX51 prikazan je na slici 10.

Slika 9: Uređaj STUERS LABOPOL



Izvor: Autor

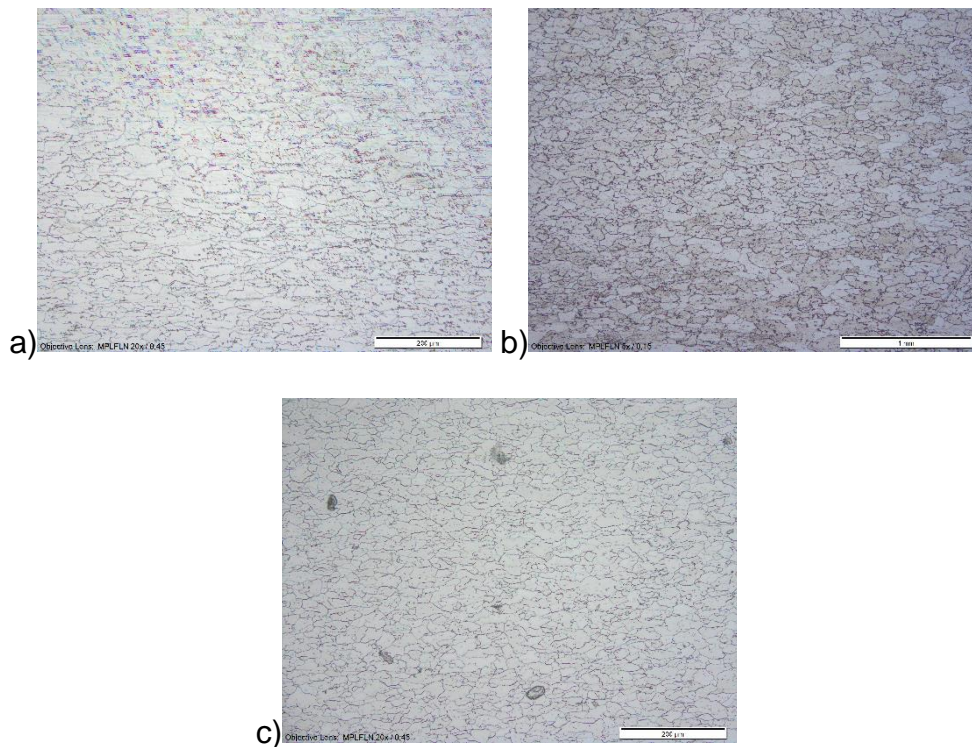
Slika 10: Metalografski mikroskop BX51 tvrtke OLYMPUS



Izvor: Autor

Mikrostruktura valjanog materijala vidi se na slici 11, jasno se raspoznaju granice zrna i njihov oblik. Vidljiva je jasna feritno-perlitna mikrostruktura tipična za niskolegirane čelične limove. Vidljiv je i smjer valjanja materijala.

Slika 11: Mikrostruktura lima rezanog pod kutem a) 0°, b) 45°, c) 90°, pri uvećanju 200x



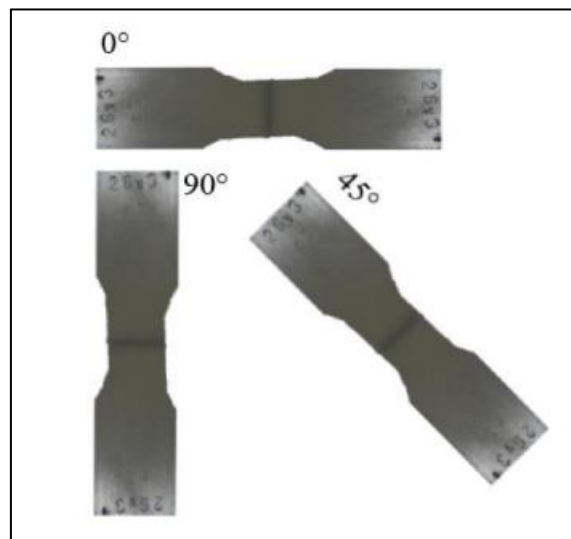
Izvor: Autor

### 3.2.3 Ispitivanje čvrstoće – vlačni test

Statički vlačni test je postupak za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala kao što su granica razvlačenja, modul elastičnosti, istežljivost, vlačna čvrstoća, suženje i slično. Uređaj za provođenje statičkog vlačnog pokusa zove se kidalica, ispitni uzorak se vlačno opterećuje sve do pojave loma. Dijelovi kidalice su kućište, mehanizam za prijenos sile na uzorak, držači epruvete te uređaj za registriranje sile i produljenja. Epruveta se postavlja u držač epruvete te se vlačno opterećuje sve do pojave loma. Mjerenjem sile i produljenja ispitne epruvete pisačem se iscrtava dijagram sila – produljenje. Nakon kidanja epruvete potrebno je izmjeriti njenu duljinu ( $L_u$ , mm) i promjer ( $L_u$ , mm). [13]

Za ispitivanje vlačne čvrstoće su korištene epruvete rezane u ravnini valjanja lima ( $0^\circ$ ), okomito na smjer valjanja lima ( $90^\circ$ ) i dijagonalno ( $45^\circ$ ) na smjer valjanja lima. Epruvete se izrezuju kako je prikazano na slici 12.

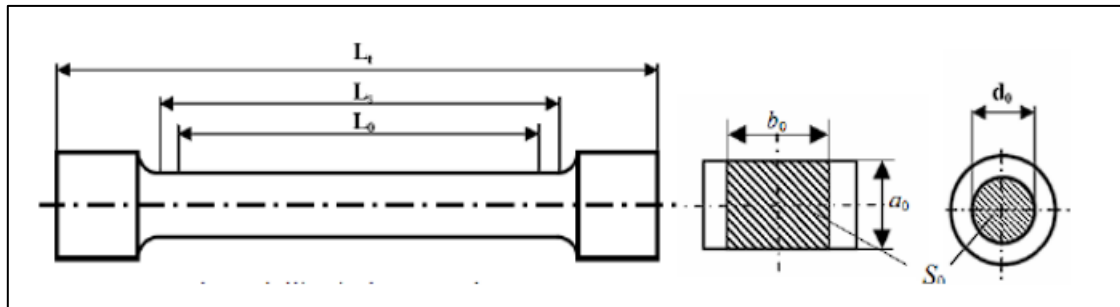
Slika 12: Smjerovi rezanja epruveta



Izvor: Skender F.: Diplomski rad, 2020. [14]

Norma HR EN ISO 6892-1 propisuje niz standardnih oblika za definiranje površine poprečnog presjeka. Propisuje se izgled ispitnih epruveta, na sljedećoj slici (slika 13) prikazane su potrebne dimenzije epruvete.

Slika 13: Oblik i mjere epruvete



Izvor: Pomenić, L.; Špada, V.; predavanja iz kolegija Materijali 2, 2021./2022. [13]

Gdje je

$L_0$  – početna mjerna duljina epruvete, mm

$L_s$  – stvarna duljina epruvete, mm

$L_t$  – ukupna duljina epruvete, mm

$d_0$  – početni promjer okrugle epruvete, mm

$a_0$  – početna debljina plosnate epruvete, mm

$b_0$  – početna širina plosnate epruvete, mm

$S_0$  – početna površina poprečnog presjeka epruvete okruglog oblika, mm

$S_0$  – početna površina poprečnog presjeka plosnate epruvete, mm

Proporcionalnim uzorcima nazivaju se uzorci kod kojih je jasno vidljiva veza između prethodno navedenih parametara te se na njih odnosi norma HR EN ISO 6892-1. Nproporcionalni uzorci se ne ispituju navedenom normom osim ako to nije određeno standardom proizvođača. Prije ispitivanja potrebno je odrediti početnu mjernu duljinu  $L_0$  i brzinu razvlačenja uzorka  $v_c$ . Početna mjerna duljina računa se prema sljedećem izrazu

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad (3.1.)$$

Gdje je

$k$  – bezdimenzijski koeficijent proporcionalnosti koji iznosi 5,65 ili 11,3. Najčešće se koristi kao vrijednost 5,65, ukoliko vrijednost  $L_0$  dobivena upotrebom tog koeficijenta iznosi manje od 20 mm, koristi se alternativna vrijednost – 11,3

$S_0$  – početna površina poprečnog presjeka uzorka

Brzina razvlačenja epruvete računa se prema izrazu

$$v_c = L_c \cdot \dot{\epsilon}_{L_c} \quad (3.2.)$$

Gdje je

$\epsilon_{L_c}$  – prirast deformacije ( $s^{-1}$ ) – podatak za koji postoji više vrijednosti. Prema normi HRN EN ISO 6892-1 preporuča se upotreba vrijednosti od  $0,00025 s^{-1}$  uz toleranciju od  $\pm 20\%$

$L_c$ , paralelna duljina za cilindrične epruvete računa se prema

$$L_c = L_0 + \frac{d_0}{2} \quad (3.3.)$$

Dok se za proporcionalne epruvete koje nisu cilindrične koristi izraz

$$L_c = L_0 + 1,5 \cdot \sqrt{S_0} \quad (3.4.)$$

Kad je prihvat za epruvetu pripremljen, ona se postavlja na uređaj koji će izmjeriti njeno produljenje u odnosu na granice  $L_0$ . U uređaj koji upravlja kidalicom, unose se dimenzije epruvete, brzina razvlačenja i ostali parametri koji se žele prikazati u rezultatima. Epruveta se zatim vlačno opterećuje sve do loma, za vrijeme ispitivanja softver crta dijagram sila-produljenje ili naprezanje-istezanje. Za mjerenje produljenja, na kidalicu se postavljaju ekstenzometri (laserski, mehanički, videoekstenzometri), njih je potrebno redovito umjeravati. [13]



## 4 PROVEDBA ISPITIVANJA UTJECAJA PLASTIČNOSTI MATERIJALA

Za potrebe ovog rada, vlačna čvrstoća ispitana je na univerzalnoj statičkoj kidalici BETA250 tvrtke Messphysik (slika 14) korištenjem laserskog ekstenzometra. Ekstenzometar je mjerni uređaj koji služi za određivanje promjene udaljenosti između dvije točke na način da uspoređuje stanja prije i nakon promjene. Ekstenzometri mogu biti beskontaktni (laserski trijagulacijski ili interferometrijski, optički, sonarni) ili kontaktni (mehanički). Laserski ekstenzometar radi na način da se na ispitnoj epruveti označe dvije točke i linija na njenoj osi čija se udaljenost nakon produljenja mjeri laserom. Prednosti laserskog ekstenzometra je mogućnost automatizacije, velika razlučivost i preciznost. [13]

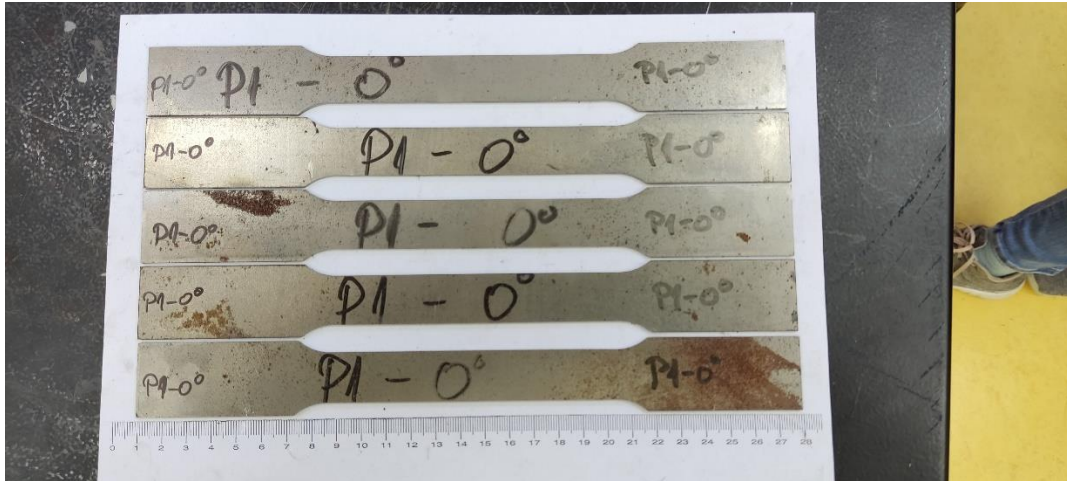
Slika 14: Univerzalnoj statička kidalica BETA250, tvrtke Messphysik



Izvor: Autor

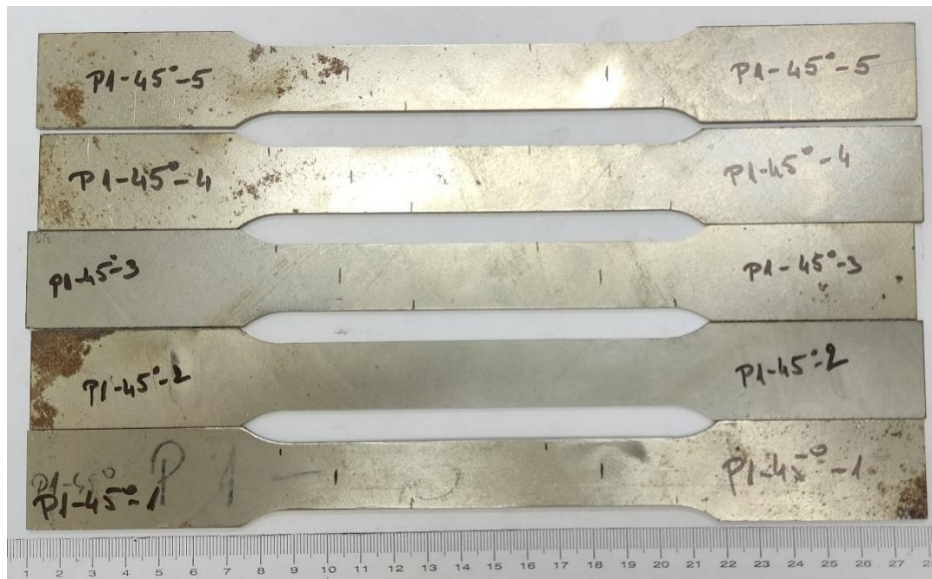
Prije izvođenja vlačnog testa epruveta koje se testiraju u sklopu ovog rada, označene su linijama početne duljine svake od epruveta kako bi se kasnije izmjerila promjena duljine. Slika 15 prikazuje prvu grupu uzoraka izrezanih paralelno sa smjerom valjanja. Na slici 16 nalaze se uzorci rezani dijagonalno na smjer valjanja i na slici 17 uzorci rezani okomito na smjer valjanja.

Slika 15: Epruvete rezanje u smjeru valjanja



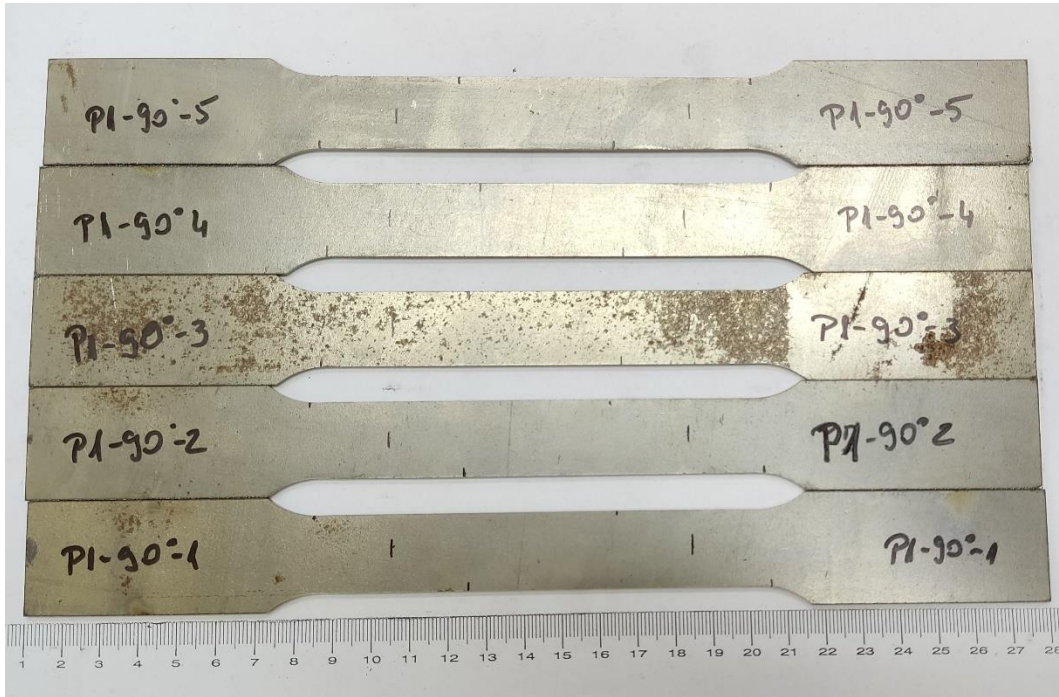
Izvor: Autor

Slika 16: Epruvete rezane pod kutom od 45°



Izvor: Autor

Slika 17: Epruvete rezane okomito na smjer valjanja

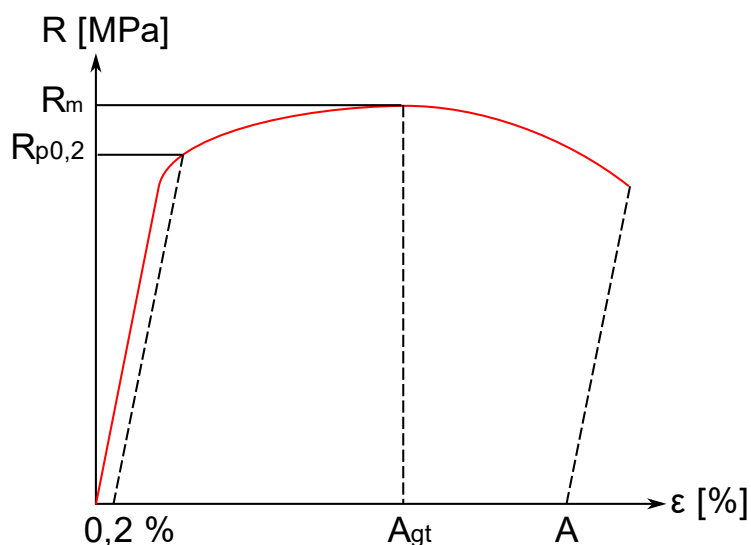


Izvor: Autor

## 5. ANALIZA REZULTATA

Granica tečenja materijala ( $R_{p0,2}$ ) je oznaka za naprezanje pri vlačnom opterećenju koje uzrokuje istezanje ispitnog uzorka bez povećanja sile. Uz vlačnu čvrstoću ( $R_m$ ), granica tečenja je jedno od bitnijih svojstava materijala na temelju kojeg se materijal vrednuje prema mehaničkoj otpornosti. Granica tečenja očitava se iz dijagrama dobivenog prilikom izvedbe vlačnog testa, odnosno dijagrama naprezanja. Vlačna čvrstoća ( $R_m$ ) predstavlja omjer vlačne sile  $F$  (N) i površine poprečnog presjeka ispitnog uzorka  $A$  ( $\text{mm}^2$ ) (slika 18). [15]

Slika 18: Dijagram naprezanje-deformacija



Izvor: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Granica\\_razvla%C4%8Denja](https://hr.wikipedia.org/wiki/Granica_razvla%C4%8Denja) [15]

Na čeličnom hladnovaljanom limu provedena su ispitivanja na uzorcima rezanim pod različitim kutovima u odnosu na smjer valjanja. Kako bi rezultati ispitivanja bili što točniji na kidalici je testirano pet uzoraka ispitne epruvete koji su rezani pod  $0^\circ$  u odnosu na smjer valjanja, isti broj uzoraka testiran je za  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja te za  $90^\circ$ , odnosno okomito na smjer valjanja. Vlačnim testom za svaku grupu ispitanih uzoraka dobiven je dijagram naprezanja. Ispitane epruvete s mjerenjima dimenzija i proračunom te označavanjem prema normi prikazane su u tablici 4.

Tablica 4: Ispitne epruvete pripremljene i označene za vlačni test

	$S_0$ (mm)	$L_0$ (mm)	Debljina epruvete (mm)	Debljina (mm)	Širina (mm)	V1/V2 (mm/min)
P1 – $0^\circ$ - 1	41,88	80	2	2,06	20,33	9,818/ 42,84
P1 – $0^\circ$ - 2	40,76	80	2	2	20,38	
P1 – $0^\circ$ - 3	40,92	80	2	2,01	20,36	
P1 – $0^\circ$ - 4	41,19	80	2	2,02	20,39	
P1 – $0^\circ$ - 5	40,19	80	2	2,01	20,37	
P1 – $45^\circ$ - 1	41,39	80	2	2,04	20,29	9,818/ 42,84
P1 – $45^\circ$ - 2	41,94	80	2	2,07	20,26	
P1 – $45^\circ$ - 3	41,23	80	2	2,03	20,31	
P1 – $45^\circ$ - 4	40,97	80	2	2,01	2,28	
P1 – $45^\circ$ - 5	40,78	80	2	2,02	2,29	
P1 – $90^\circ$ - 1	40,97	80	2	2,02	20,28	9,818/

P1 – 90° - 2	40,78	80	2	2,01	20,29	42,84
P1 – 90° - 3	40,76	80	2	2,01	2,28	
P1 – 90° - 4	41,17	80	2	2,03	20,28	
P1 – 90° - 5	41,31	80	2	2,04	20,25	

Izvor: Autor

Rezultati mehaničkih svojstava, vlačne čvrstoće, triju različitih grupa uzoraka prikazani su u tablici 5.

Tablica 5: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće i produljenja

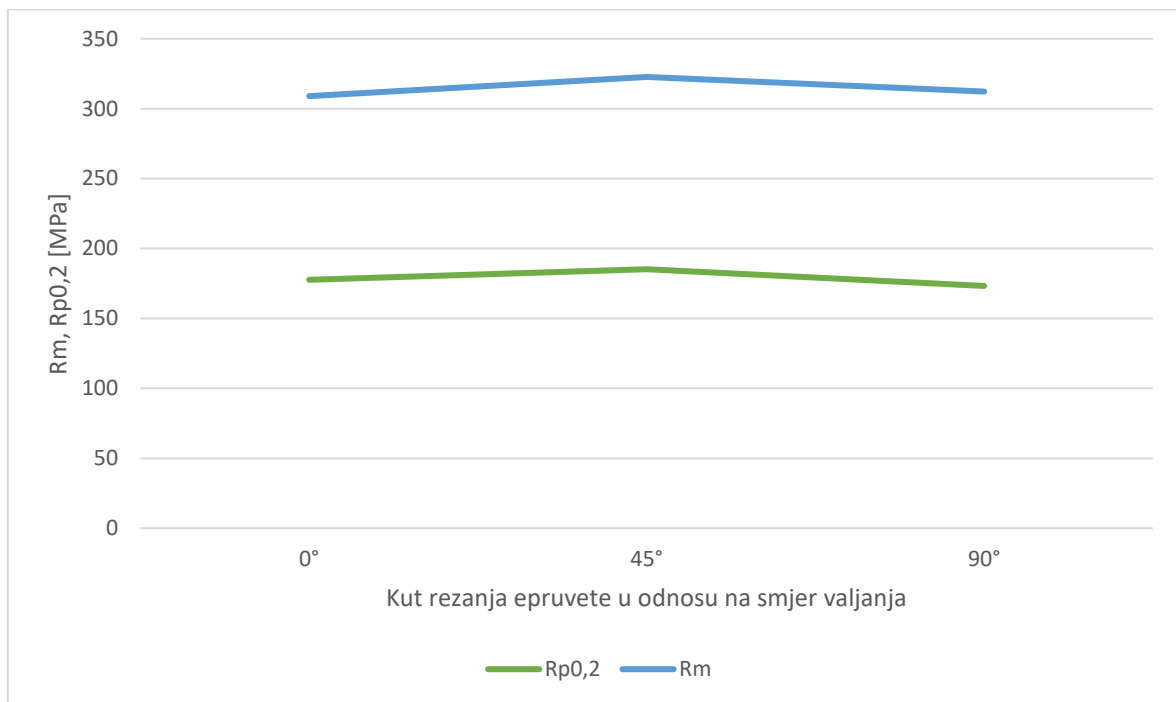
UZORAK	$R_{p0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	A, %	Oznaka u dijagramu
P1 – 0° - 1	176,7	304,9	43,14	1125
P1 – 0° - 2	179,3	312,5	43,53	1126
P1 – 0° - 3	177,8	308,9	43,20	1127
P1 – 0° - 4	177,2	308,3	42,67	1128
P1 – 0° - 5	176,9	310,4	42,74	1129
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>177,58</b>	<b>309</b>	<b>43,06</b>	
P1 – 45° - 1	185,7	322,7	38,73	1156
P1 – 45° - 2	182,3	319,3	35,72	1157
P1 – 45° - 3	182,8	322,5	36,99	1159
P1 – 45° - 4	188,6	322,9	37,21	1160
P1 – 45° - 5	186,7	326,1	38,54	1161
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>185,22</b>	<b>322,70</b>	<b>37,44</b>	
P1 – 90° - 1	173,9	313,5	43,65	1162
P1 – 90° - 2	175,8	316,8	43,53	1163
P1 – 90° - 3	172,0	311,4	43,65	1164
P1 – 90° - 4	173,3	311,2	44,71	1165
P1 – 90° - 5	171,3	308,8	44,29	1166
<b>Srednja vrijednost</b>	<b>173,26</b>	<b>312,34</b>	<b>43,97</b>	

Izvor: Autor

Rezultati pokazuju da je deformacija bila najveća u smjeru valjanja limova odnosno pri 0° vlačna čvrstoća iznosi 309 MPa. Za kut od 90° u odnosu na smjer valjanja vlačna čvrstoća iznosila je 312,34 MPa. Najveća mogućnost plastičnog deformiranja

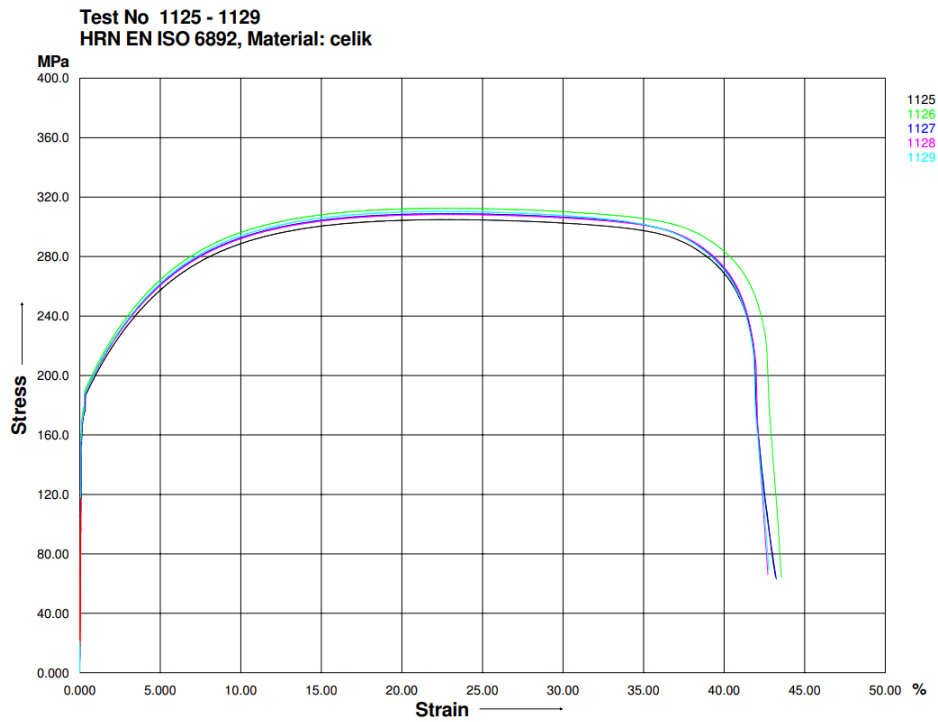
prikazana je pod kutom od  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja, vlačna čvrstoća iznosi 322,70 MPa.

Slika 19: Dijagram ovisnosti mehaničkih svojstava hladnovaljanog lima u odnosu na kut rezanja ispitnih epruveta

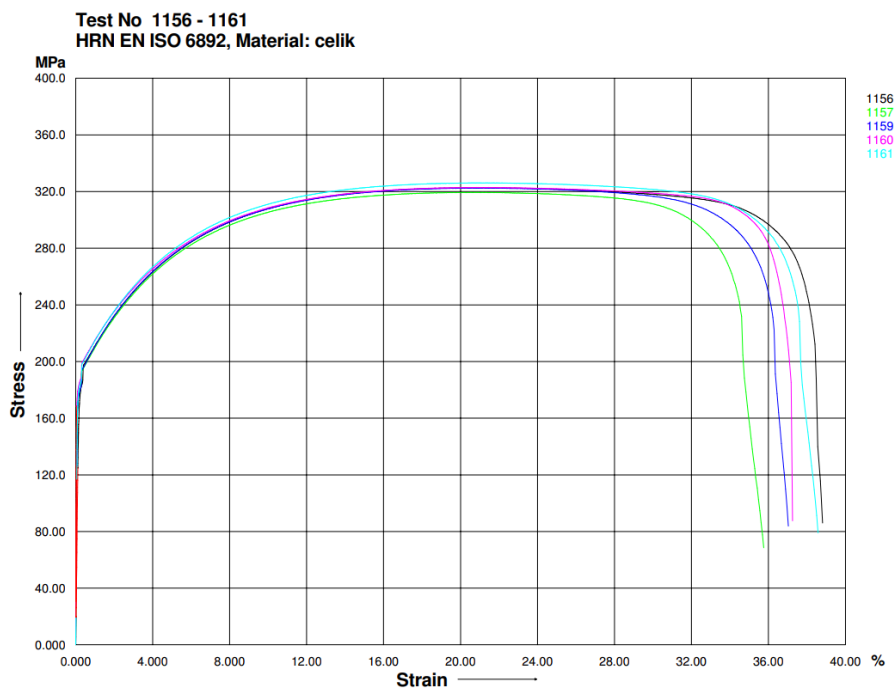


Izvor: Autor

Prema dijagramu na slici 19 vidljivo je da granica tečenja i vlačna čvrstoća imaju nešto veće vrijednosti za uzorke rezane pod  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja. Najmanju vrijednost granice tečenja ( $R_{p0,2}$ ) imaju uzorci rezani okomito na smjer valjanja dok najmanju vrijednost vlačne čvrstoće imaju uzorci rezani u ravnini valjanja lima.

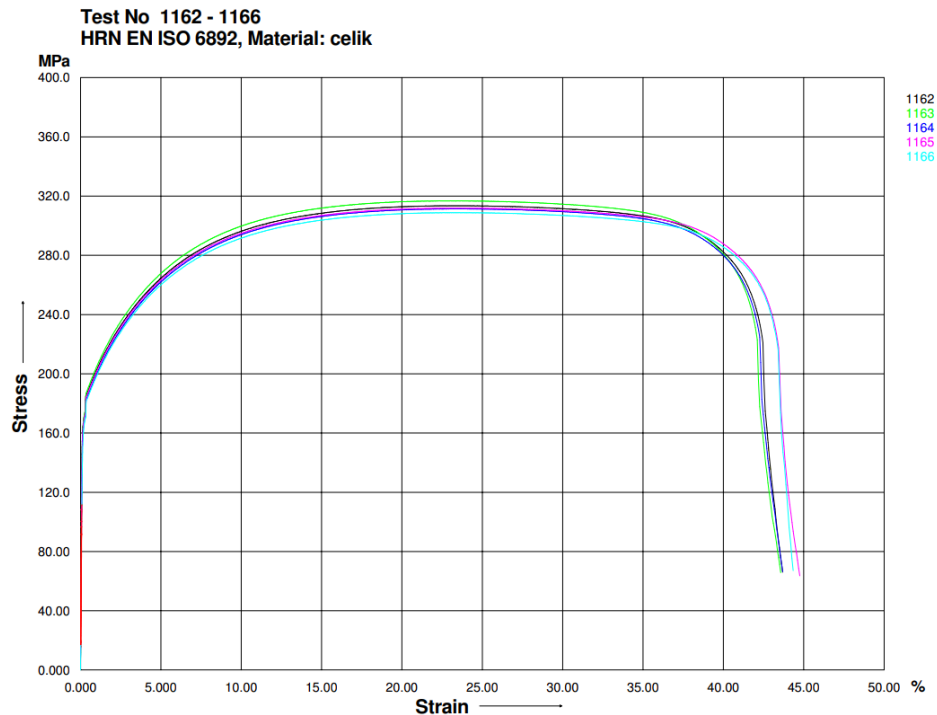
Slika 20: Skupni dijagram za epruvete rezane u ravnini valjanja ( $0^\circ$ )

Izvor: Autor

Slika 21: Skupni dijagram za epruvete rezane pod kutom od  $45^\circ$  u odnosu na smjer valjanja

Izvor: Autor

Slika 22: Skupni dijagram za epruvete rezane okomito u odnosu na ravninu valjanja (90°)



Izvor: Autor

Na slikama 20, 21 i 22 dani su dijagrami naprezanje - istežanje za svaku skupinu epruveta. Rezultati pokazuju neznatna rasipanja u pojedinoj skupni uzoraka.

## 6. IZRAČUN KOEFICIJENTA ANIZOTROPIJE I KRIVULJE TEČENJA

Koeficijent anizotropije obilježava se slovom  $r$ , naziva se još i Lankfordovim koeficijentom koji izražava omjer poprečnog naprežanja i debljine. Koeficijent  $r$  daje dobru procjenu o sposobnosti lima da se deformira u obliku dubokog izvlačenja ( $r_0 \neq r_{45} \neq r_{90}$ ). Greška koja nastaje zbog anizotropije je ušičavost. Poznavanjem anizotropije materijala možemo eliminirati pojavu ušičavosti koja rezultira otpadom i općenito lošom iskoristivosti materijala. [16] Koeficijent anizotropije  $r$  izračunava se prema:



$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_t} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{l \cdot b}{l_0 \cdot b_0}} \quad (6.1.)$$

gdje je:

$\varphi_b$  - deformacija širine lima

$\varphi_t$  - deformacija debljine lima

$b_0$  - početna širina ispitivane epruvete

$b$  - širina ispitivane epruvete poslije deformacije

$l_0$  - početna duljina epruvete

$l$  - duljina epruvete poslije deformacije.

Debljina lima se dobiva prema zakonu o konstantnosti volumena  $l_0 \cdot b_0 \cdot t_0 = l \cdot b \cdot t =$  konstantno.

U tablicama 6 i 7 izmjerena je prosječna početna i završna širina i duljina epruvete.

Tablica 6: Početna i završna širina epruvete

		Početna širina		Završna širina
P1-0	$b_0$	20,38	$b$	12,27
P1-45	$b_0$	20,29	$b$	14,21
P1-90	$b_0$	20,28	$b$	12,09

Izvor: Autor

Tablica 7: Početna i završna duljina epruvete

		Početna duljina		Završna duljina
P1-0	$l_0$	80	$l$	114,44
P1-45	$l_0$	80	$l$	109,95
P1-90	$l_0$	80	$l$	115,17

Izvor: Autor

Uvrštavanjem u izraz (6.1.) dobiva se:

Tablica 8: Rezultati dobiveni prema izrazu (6.1.)

$r_0$	-114,149
$r_{45}$	-78,6181
$r_{90}$	-115,931

Izvor: Autor

Anizotropija se otkriva pomoću ispitivanja vlačne čvrstoće te se označava koeficijentima  $r_0$ ,  $r_{45}$  i  $r_{90}$ , prema izrazu (6.2.) dobiva se srednja vrijednost koeficijenta normalne plastične anizotropije  $r_s$ :

$$r_s = \frac{r_0 + 2 \times r_{45} + r_{90}}{4} \quad (6.2.)$$

$$r_s = \frac{-114,149 + 2 \times (-78,6181) + (-115,931)}{4} \quad (6.3.)$$

$$r_s = -96,829 \quad (6.4.)$$

Rezultat je pokazao negativan koeficijent anizotropije, to znači da materijal nema veliku mogućnost oblikovanja te da je osjetljiv na stanjivanje i lom kada je opterećen pod kutom od  $45^\circ$  u odnosu na smjer  $0^\circ$  i  $90^\circ$ .

To se može prikazati sljedećom relacijom:

$$(2 \cdot r_{45}) > (r_0 + r_{90}) \rightarrow (r_{45}) > \text{prosječno } (r_0 \text{ i } r_{90})$$

To je i očekivano te je dokaz da se taj materijal prema preporuci proizvođača treba koristiti za jednostavna savijanja, utiskivanja i provlačenja te bi za duboko vučenje bilo bolje koristiti materijal DC03.

Na temelju relacije (6.2.) za duboko izvlačenje metalnih limova tolerancija je  $r_s = 0,8 - 6$ , a za izotropne limove  $r_s = 1$  (Davis 2004). Koeficijent ravninske anizotropije je mjerilo  $\Delta r$  koje govori kakvo je odstupanje normalne plastične anizotropije na kut  $\alpha$ . Kut  $\alpha$

predstavlja smjer odrezivanja epruvete iz lima u odnosu na smjer vučenja lima, tako da je  $r = r(\alpha)$ . Kada bi izraz (6.5.) bio  $\Delta r = 0$ , materijal bi se u svim smjerovima jednako rastezao.

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2 \times r_{45} + r_{90}}{2} \quad (6.5.)$$

$$\Delta r = \frac{-114,149 - 2 \times (-78,6181) + (-115,931)}{2} \quad (6.6.)$$

$$\Delta r = \frac{-114,149 - 2 \times (-78,6181) + (-115,931)}{2} \quad (6.7.)$$

$$\Delta r = -36,422 \quad (6.8.)$$

Uvrštavanjem rezultata u izraz (6.5.) dobiva se rezultat:  $\Delta r = -36,422$  što označava neravne rubove u procesima dubokog vučenja i obrade limova deformiranjem. U tim slučajevima treba pažljivo izračunati i provjeriti utjecaj i oblik alata na proces oblikovanja kako bi se dobio što precizniji proizvod. Što se tiče izračuna ukupne vlačne čvrstoće i krivulje tečenja materijala pri deformiranju treba uzeti u obzir anizotropiju. Anizotropija ovdje ima značajnu ulogu pri izračunu faktora materijala  $C$  te eksponenta očvršćivanja  $n$  za ispitivani lim. Pri izračunu je potrebno uzeti u obzir orijentaciju ispitnih epruveta u smjerovima  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$  kako bi se definiralo ponašanje lima u postupcima deformiranja. [17] Pri tome se faktor materijala  $C$  te eksponent očvršćivanja  $n$  izračunavaju prema izrazu (6.9.), izračun srednje vrijednosti vrijedi i za  $R_p$  i  $R_m$ :

$$(C, n) = \frac{x_0 + 2 \times x_{45} + x_{90}}{4} \quad (6.9.)$$

Tablica 9: Prosječno dobivene vrijednosti vlačne čvrstoće

$R_{m0}$	309 MPa
$R_{m45}$	322,7 MPa
$R_{m90}$	312,34 MPa
$C$	316,685 MPa

Izvor: Autor

Youngov modul elastičnosti ili samo modul elastičnosti predstavlja mjeru krutosti materijala. On se računa kao omjer vlačnog naprezanja i linijske vlačne deformacije, u linearnom ili elastičnom dijelu dijagrama naprezanja. Youngov modul elastičnosti za čelik DC01 prikazan je kao 200 GPa međutim u istraživanju je izračunat prosječni od 184,29 GPa prema tablici.

Tablica 10: Youngov modul elastičnosti

Smjer valjanja	90°	45°	0°
$E(\text{MPa})$	199,10	116,00	142,70
$E(\text{MPa})$	172,50	237,70	218,70
$E(\text{MPa})$	155,90	216,30	167,80
$E(\text{MPa})$	168,80	207,10	196,60
$E(\text{MPa})$	135,10	210,10	220,00
$E(\text{MPa})$ prosjek	166,28	197,44	189,16
$E(\text{MPa})$	Prosjek	184,29	

Izvor: Autor

EkspONENT očvršćivanja očitao je od rezultata koji su dobiveni u eksperimentalnim pokusima te iznosi 0,1415. Koeficijent očvršćivanja za materijal DC01 nije uvijek dan u standardima i očekuje se da je manji od 0,180 koliko je predviđeno za DC04, dok je za DC05 predviđen u rasponu od 0,200 a za DC06 0,220. EkspONENT očvršćivanja određuje kako će se materijal ponašati prilikom obrade deformiranja. Materijali koji imaju veći ekspONENT očvršćivanja mogu se više oblikovati jer označavaju veću mogućnost očvršćivanja.

Tablica 11: Mehanička svojstva dobivena ispitivanjem vlačne čvrstoće DC01 (1.0330): EN 10130-2006

Mehanička svojstva	Standard	Laboratorijski rezultati		
		0°	45°	90°
$R_{p0,2}$ (MPa)	140 - 280	177,58	185,22	173,26
Vikersova tvrdoća (HV): (+A)	105	106,4 HV		
A (%) $Lo = 5,65 \sqrt{So}$ (%) (+A)	32	43,056	37,438	43,966
$A_{80}$	28			
$\sigma_m = R_m$ (MPa)	270-410	309	322	312,338
$E$ Youngov modul elastičnosti	200 GPa Prosjek izmjerenog 184,293 GPa.	189,16	197,44	166,28
$n$	<0,180	0,1415		
$C$ (MPa)	316,685			
Srednja vrijednost koeficijenta normalne plastične anizotropije ( $r_s$ ) = - 96,829				
Koeficijent ravninske anizotropije $\Delta r = - 36,422$				

Izvor: Autor

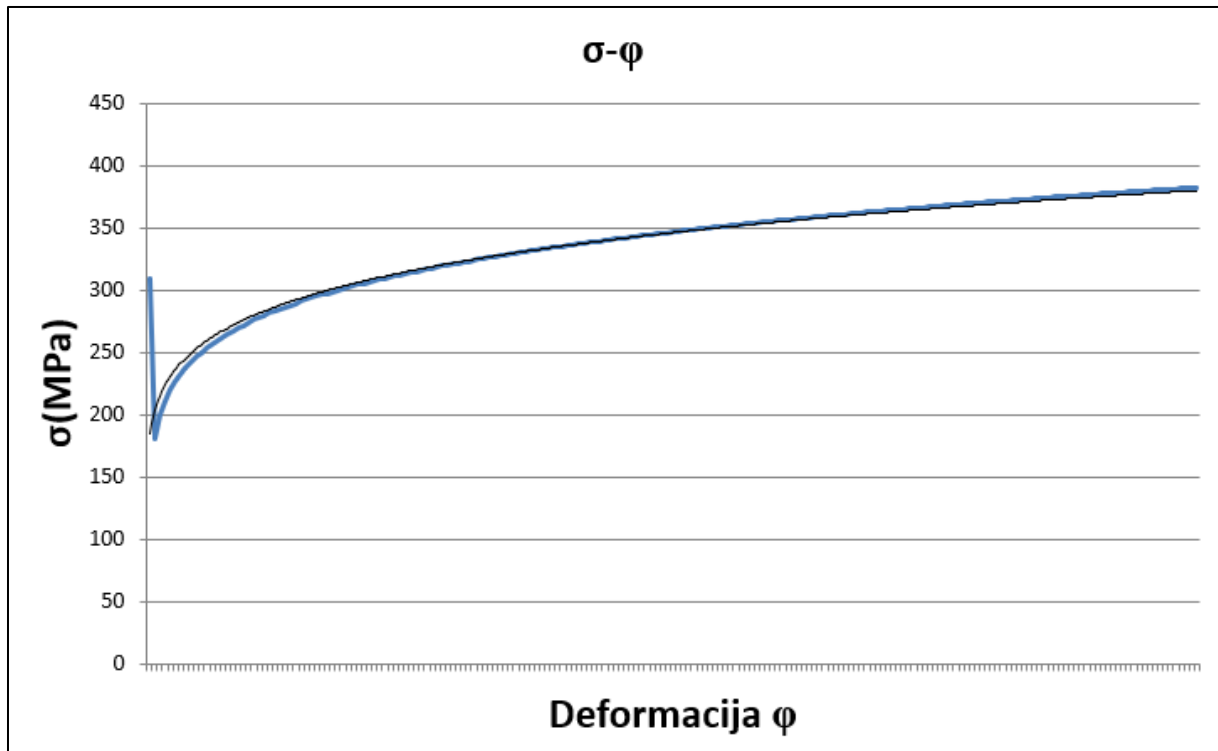
Realno ponašanje materijala kada je podvrgnuto opterećenju biti će prema krivulji tečenja koja je izračunata prema grafikonu na slici 23 a koji uzima u obzir Holloman-Ludwigovu relaciju (7).

$$k_f = C \cdot \varphi^n = 316,685 \cdot \varphi^{0,1415} \text{ MPa} \quad (6.10.)$$

Takva rezultirajuća krivulja tečenja može se koristiti za simulaciju ponašanja materijala u različitim softverskim rješenjima poput softvera Autodesk Fusion 360 i slično.

Sama relacija datira kada je Holloman je 1945. iznio empirijski matematički odnos kako bi opisao oblik inženjerske krivulje naprezanje-deformacija.  $\sigma = K \varepsilon^n$ , gdje je  $\sigma$  pravo naprezanje,  $\varepsilon$  je stvarno naprezanje,  $K$  je koeficijent čvrstoće (jednak stvarnom naprezanju pri  $\varepsilon = 1,0$ ), a  $n$  je eksponent deformacijskog otvrdnjavanja.

Slika 23: Rezultirajuća krivulja tečenja (krivulje naprezanje - deformacija  $\sigma - \varphi$ )



Izvor: Autor

## 7. ZAKLJUČAK

Materijali koji se nalaze u prodaji odgovaraju određenim standardima te se nude za izradu određenih proizvoda. U ovome radu izvršeno je ispitivanje mehaničkih svojstava materijala kako bi se ispitala njegova sposobnost za obradu deformiranjem te odredila krivulja tečenja materijala.

Rezultati ispitivanja su pokazali da materijal u svim segmentima odgovara klasifikaciji DC01 međutim postoje varijacije u rezultatima koje značajno mogu utjecati na obradu materijala.

Ispitana su mehanička svojstva materijala prema kojima je standard vrijednosti granice tečenja od 140-280 MPa, može se primijetiti da je standard zadovoljen za sva tri kuta rezanja epruvete. Vrijednost tvrdoće prema Vickersu nešto je veća od minimalne potrebne stoga ispitane epruvete zadovoljavaju kriterij tvrdoće. Ispitana vlačna čvrstoća za sva tri slučaja nalazi se unutar granica određenih standardom a iznosi prosječno 314 MPa. Najveći Youngov modul elastičnosti dobiven je za epruvete rezane pod kutom od 45° u odnosu na smjer valjanja lima, slijede epruvete rezane u ravnini valjanja lima te epruvete rezane pod kutom od 90°. Prosjek izmjerenog Youngovog modula elastičnosti iznosi 184,293 MPa što je manje od vrijednosti propisane standardom (200 MPa). Rezultirajući faktor materijala C iznosi 316,685 MPa, dok je eksponent očvršćivanja  $n = 0,1415$  unutar standarda, odnosno  $0,1415 < 0,180$ . Prema vlačnom testu dobivena je vrijednost  $\Delta r = - 36,422$  što znači kako se materijal ne razvlači jednako u svim smjerovima pri procesima dubokog vučenja i obrade limova deformiranjem.

Iz dobivenih rezultata ispitivanja može se zaključiti kako epruvete rezane pod kutom od 45° u odnosu na smjer valjanja lima imaju najbolja mehanička svojstva. Metalografska analiza prikazuje smjer valjanja lima, tj. usmjerenost zrna.

**POPIS SLIKA**

Slika 1: Pregled postupaka oblikovanja metala .....	3
Slika 2: Kovanje u ukovnju.....	4
Slika 3: Izvlačenje .....	5
Slika 4: Valjanje .....	6
Slika 5: Vrste valjanja .....	6
Slika 6: Greške u kristalnoj rešetci.....	7
Slika 7: Optički emisijski spektrometar GDS500A LECO.....	9
Slika 8: Tvrdomjer DURAMIN 2.....	11
Slika 9: Uređaj STUERS LABOPOL .....	12
Slika 10: Metalografski mikroskop BX51 tvrtke OLYMPUS .....	13
Slika 11: Mikrostruktura lima rezanog pod kutem a) 0°, b) 45°, c) 90°, pri uvećanju 200x .....	13
Slika 12: Smjerovi rezanja epruveta .....	14
Slika 13: Oblik i mjere epruvete .....	15
Slika 14: Univerzalnoj statička kidalica BETA250, tvrtke Messphysik .....	17
Slika 15: Epruvete rezanje u smjeru valjanja .....	18
Slika 16: Epruvete rezane pod kutom od 45° .....	18
Slika 17: Epruvete rezane okomito na smjer valjanja .....	19
Slika 18: Dijagram naprezanje-deformacija .....	20
Slika 19: Dijagram ovisnosti mehaničkih svojstava hladnovaljanog lima u odnosu na kut rezanja ispitnih epruveta .....	22
Slika 20: Skupni dijagram za epruvete rezane u ravnini valjanja (0°) .....	23
Slika 21: Skupni dijagram za epruvete rezane pod kutom od 45° u odnosu na smjer valjanja .....	23
Slika 22: Skupni dijagram za epruvete rezane okomito u odnosu na ravninu valjanja (90°).....	24
Slika 23: Rezultirajuća krivulja tečenja (krivulje naprezanje - deformacija $\sigma - \varphi$ ).....	30



**POPIS TABLICA**

Tablica 1: Kemijski sastav čelika DC01 prema EN 10130-2006 .....	8
Tablica 2: Kemijski sastav ispitivanog uzorka materijala DC01 .....	10
Tablica 3: Rezultati ispitivanja tvrdoće po Vickersu uzorka materijala DC01 .....	11
Tablica 4: Ispitne epruvete pripremljene i označene za vlačni test .....	20
Tablica 5: Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće i produljenja.....	21
Tablica 6: Početna i završna širina epruvete .....	25
Tablica 7: Početna i završna duljina epruvete .....	25
Tablica 8: Rezultati dobiveni prema izrazu (6.1.) .....	26
Tablica 9: Prosječno dobivene vrijednosti vlačne čvrstoće .....	27
Tablica 10: Youngov modul elastičnosti .....	28
Tablica 11: Mehanička svojstva dobivena ispitivanjem vlačne čvrstoće DC01 (1.0330): EN 10130-2006 .....	29

## LITERATURA

- [1] Rešković, S.: Osnovne teorije oblikovanja deformiranjem, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2020.
- [2] Slade, I.: Obrada materijala II, [www.cnt.tesla.hr](http://www.cnt.tesla.hr), 2012.
- [3] [https://www.schulergroup.com/major/us/technologien/produkte/grundlagen\\_massiv\\_umformung\\_gesenkschmieden/index.html](https://www.schulergroup.com/major/us/technologien/produkte/grundlagen_massiv_umformung_gesenkschmieden/index.html), 15.08.2023.
- [4] <https://capitalsteel.net/blog/cold-drawn-steel-common-questions>, 15.08.2023.
- [5] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Valjanje>, 15.08.2023.
- [6] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=63798>, 16.08.2023.
- [7] Rešković, S.: Teorija oblikovanja deformiranjem, Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, 2014.
- [8] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Anizotropija>, 20.08.2023.
- [9] [http://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=199](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=199), 20.08.2023
- [10] <https://xometry.eu/wp-content/uploads/2022/08/Steel-1.0330-DC01-6112.pdf>, 25.08.2023.
- [11] <https://antiteck.com/hr/opti%C4%8Dki-emisijski-spektrometar-2/#headline-481-704>, 21.08.2023.
- [12] <https://www.ispitivanje.com/smjernice-za-ispitivanje-tvrdoce/>, 21.08.2023.
- [13] Pomenić, L.; Špada, V.; predavanja iz kolegija Materijali 2, 2021./2022.
- [14] Skender F.: Diplomski rad, 2020.
- [15] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Granica\\_razvla%C4%8Denja](https://hr.wikipedia.org/wiki/Granica_razvla%C4%8Denja), 21.08.2023.
- [16] Povržanović, A. (1996) Odabrana poglavlja obrade metala deformiranjem, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [17] Gologranc, F. (1991) Preoblikovanje: 1. dio, Ljubljana: Fakulteta za strojništvo

## SAŽETAK

Čelik je jedan od najkorištenijih materijala na svijetu, a valjanje najčešći proces njegove deformacije. U ovom radu ispitan je utjecaj plastičnosti materijala tj. njegova anizotropija. Materijal (hladnovaljani čelik DC01) je ispitan emisijskim masenim spektrometrom kako bi se utvrdio njegov kemijski sastav te odgovara li standardu. Metalografska analiza je odrađena kako bi se provjerio raspored zrna te njihovo usmjerenje. Nakon toga epruvete rezane pod 0°, 45° i 90° u odnosu na smjer valjanja podvrgnute su statičkom vlačnom testu te dobiveni su različiti rezultati što potvrđuje da se radi o anizotropnom materijalu. Na kraju rada je dan pregled i zaključak s obzirom na različite rezultate mjerenja ovisno o kutu rezanja uzoraka.

Ključne riječi: *anizotropija, čelik DC01, emisijski maseni spektrometar, metalografska analiza, statički vlačni test*

## SUMMARY

Steel is one of the most widely used materials in the world, and rolling is the most common process for its deformation. In this study, the influence of material plasticity, specifically its anisotropy, was examined. The material (cold-rolled steel DC01) was analyzed using emission mass spectrometry to determine its chemical composition and conformity to the standard. Metallographic analysis was conducted to verify the grain distribution and their orientation. Subsequently, specimens were cut at 0°, 45°, and 90° with respect to the rolling direction and subjected to a static tensile test, yielding different results, confirming that the material is anisotropic. Finally, the paper provides an overview and conclusions based on the varying measurement results depending on the cutting angle of the samples.

Keywords: *anisotropy, steel DC01, emission mass spectrometry, metallographic analysis, static tensile test*